

ALFREDO DUARTE DE ARAÚJO

**DINÂMICA SEDIMENTAR E EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DO SACO DO
LIMOEIRO NA ILHA DO MEL, E SUA RELAÇÃO COM O CANAL DE ACESSO AO
PORTO DE PARANAGUÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre, pelo Curso de
Pós-Graduação em Geologia Ambiental,
Departamento de Geologia, Setor de Ciências
da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo
Co-orientadores: Prof. Dr. Eduardo Marone
Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

**CURITIBA
2001**

TERMO DE APROVAÇÃO

ALFREDO DUARTE DE ARAÚJO

**“DINÂMICA SEDIMENTAR E EVOLUÇÃO
PALEOGEOGRÁFICA DO SACO DO LIMOEIRO NA ILHA
DO MEL, E SUA RELAÇÃO COM O CANAL DE ACESSO AO
PORTO DE PARANAGUÁ”**

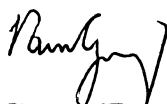
**Dissertação em mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação
em Geologia, com área de concentração em Geologia Ambiental,
da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos
Professores:**



**Prof. Dr. Rodolfo José Angulo
Presidente**



Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes



Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

Curitiba, 06 de abril de 2001.

A minha Mãe Berenice.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE ABREVIATURAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
4. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL	3
4.1. Localização e acesso à área de estudo	3
4.2. Geologia e evolução da planície costeira paranaense	4
4.4. O complexo estuarino da Baía de Paranaguá	9
4.5. Fatores oceanográficos	10
5. CARACTERIZAÇÃO DO SACO DO LIMOEIRO	12
5.1. Revisão bibliográfica	12
5.1.1. Deltas de maré	12
5.1.2. Formas de fundo em deltas de maré enchente	15
5.2. Meios e métodos	17
5.3. Resultados	19
5.3.1. Sedimentos de fundo	19
5.3.2. Formas de fundo	21
5.3.3. Mudanças na configuração do fundo entre 1980 e 1998	24
5.4. Discussão	25
6. CORRENTES DE MARÉ E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	27
6.1. Método	27
6.2. Resultados	29
6.3. Discussão	33

7. ESTRATIGRAFIA E EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA	35
7.1. Estruturas sedimentares da barreira holocênica	35
7.2. Materiais e métodos	37
7.2.1. Sondagens por vibro-testemunhador e descrição de afloramentos	37
7.2.2. Amostragem com amostrador-em-caixa	40
7.2.3. Nivelamento	40
7.3. Resultados	41
7.3.1. Afloramentos e sondagens na Ilha do Mel	43
7.3.2. Sondagens no Saco do Limoeiro	49
7.3.3. Sondagem na planície arenosa próxima ao canal da DNOS	54
7.4. Discussões	55
7.4.1. Unidades sedimentares	55
7.4.2. Evolução paleogeográfica	59
 8. A DINÂMICA SEDIMENTAR NO SACO DO LIMOEIRO E SUA RELAÇÃO COM O SETOR INTERNO DO CANAL DA GALHETA	 63
 9. CONCLUSÕES	 65
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 68

AGRADECIMENTOS

Ao mestre Prof. Dr. Rodolfo José Angulo pela inestimável contribuição ao meu desenvolvimento científico e pela muito apreciada e eterna disposição em ensinar.

Ao Prof. MSc. Carlos Roberto Soares por acreditar e dar a oportunidade honrosa de trabalhar ao seu lado, e por fazer notar a importância das relações humanas no ambiente de trabalho e o valor da amizade.

Ao Prof. Dr. Guilherme Camargo Lessa que sempre compartilhou sua experiência e conhecimento.

À “turma lá da sala” Marcelo Renato Lamour, Lydio Luiz Odresky, João Carlos Carrilho, e às meninas do laboratório Márcia Salete Bernini e Sirlei Ghisi de Oliveira pela excelente convivência e grandes ajudas.

À “turma da física” Luiz Fernando de Carli Lautert, Vicente de Paula Prata Júnior, Murillo Staben Klingenfuss, Clécio José Lopes de Quadros e Georgina Jacinto Martins pela ajuda em campo e diversão no dia a dia.

A Mauricio Almeida Noernberg que auxiliou no projeto de saídas de campo e interpretação de dados.

À Maria Cristina de Sousa amiga sempre disposta.

A Nelson Yoneda pelo excelente trabalho fotográfico feito com os testemunhos de sondagem.

Ao Cm. José Roberto da Silva Santos e Alcimar da Silva Henrique (ASSUMAR – APPA) por cederem fotografias aéreas e um levantamento batimétrico da área estudada.

À todos do CEM, a Vilma Andrade e Elair do Nascimento da administração, à equipe da náutica Abraão de Campos, Josias da Silva e José Serafim, e ao Raul Dias Serafim da manutenção.

Especialmente à minha madrinha Riva Schuck e aos primos Sandra e Fábio Schuck que, com extrema gentileza e benevolência, proveram a estrutura e tranquilidade de um lar em Pontal do Sul, sem exigir qualquer tipo de retribuição.

À APPA que, através do convênio firmado com a FUNPAR e o CEM, proveu os recursos que tornaram possível a realização deste estudo.

A todos os inúmeros amigos e parentes que de alguma forma contribuíram para este trabalho, e especialmente Annapaola Garcia Ravazzani.

RESUMO

A desembocadura sul da Baía de Paranaguá possui um importante papel no desenvolvimento econômico e social do Estado do Paraná. Nela foi dragado o Canal da Galheta, que dá acesso ao porto de Paranaguá. Este canal tem tido problemas de assoreamento. Nesta desembocadura está a Ilha do Mel, e em sua margem sudoeste existe um embaçamento com profundidades rasas denominado Saco do Limoeiro que é o objeto desse estudo, e que contribui para o entendimento da dinâmica sedimentar no setor interno da Baía de Paranaguá.

Os objetivos desse trabalho foram; caracterizar os sedimentos e formas de fundo; determinar o comportamento de correntes de maré, assim como sua capacidade de transportar sedimentos por tração durante um ciclo de maré de sizígia; interpretar ambientes de sedimentação e a evolução paleogeográfica da Ilha do Mel; e determinar a relação entre os processos sedimentares do Saco do Limoeiro e do setor interno da Baía de Paranaguá.

Amostragem de sedimentos, medições de correntes e comparação entre fotos aéreas e um levantamento batimétrico, permitiram concluir que; os sedimentos do fundo são compostos em geral por 95% de grãos terrígenos sendo areia fina a fração granulométrica média; três classes de formas de fundo ocorrem (ondas de areia, mega-ondulações e marcas onduladas); as ondas de areia apresentaram deslocamentos mínimos entre 1,3 e 3 m/ano num período de 18 anos; as correntes de maré mais intensas num ciclo de maré de sizígia ocorrem em períodos de vazante (43,8 cm/s) sendo que a média foi de 24,2 cm/s; sedimentos não-coesivos são transportados por tração geralmente em correntes de maré vazante, que fluem nos sentidos S-SE, com velocidades superiores a 15,8 cm/s medidas a 50 cm do fundo.

A dinâmica sedimentar no Saco do Limoeiro é controlada por processos que atuam em escalas de tempo diferentes. Durante ciclos de sizígia em condições de mar calmo o transporte de sedimentos ocorre seguindo sentidos de vazante, mas pode ter seu sentido invertido em eventos de maior energia como durante marés meteorológicas que frequentemente estão associadas a passagem de frentes frias. Desta forma o Saco do Limoeiro pode contribuir para o assoreamento do setor interno do Canal da Galheta.

Com base em trabalhos anteriores e descrições de sondagens e afloramentos, concluiu-se que a Ilha do Mel surgiu com a emersão de uma praia sobre sedimentos de um delta de maré enchente depois de 5.100 A.P. O registro geológico do Saco do Limoeiro pode ser interpretado como sendo o de um campo de ondas de areia com estruturas sedimentares similares às de uma planície de maré. O Saco do Limoeiro instalou-se a partir de 2.850 ± 30 anos A.P., sobre uma plataforma formada pela erosão da margem sudoeste da Ilha do Mel. Essa erosão seria decorrente da interação entre correntes de maré e os pontais rochosos do sul da Ilha do Mel.

ABSTRACT

The inlet of Baía de Paranaguá have an important role on the economic and social development of the State of Paraná, as it provides access to an important harbour in south brazil. In the ebb tidal delta contiguous to the inlet, the Galheta's channel was dredged, and since then it has experienced constant shoaling problems. Inside the bay, a large and shallow area named Saco do Limoeiro is characterised by several shoals. The investigation of sedimentation processes on Saco do Limoeiro can contribute to the understanding of the sediment dispersal processes at the bay's mouth.

This works aims i) to characterise the bottom sediments and bedforms in Saco do Limoeiro; ii) to characterise the pattern of the tidal currents in the area and assess their capability to transport the bottom sediments; iii) to interpret the sedimentary environments and propose a paleogeographic evolution of the area, and iv) to determine the relationship between the sedimentation processes on Saco do Limoeiro and internal area of Paranaguá's inlet.

Sediment sampling, tidal current monitoring, ecosounding surveys and comparisons between aerial photographs indicate that: i) the sediments are represented by fine sand with 95% of quartz grains; ii) three classes of bed forms, sand waves, megaripples and ripples, occur in the area; iii) the minimum celerity of sand waves averaged between 1,3 e 3 m/y in the last 18 years; iv) the fastest tidal currents occur during the ebb tide (43,8 cm/s) with a mean speed of 24,2 cm/s; v) non-cohesive sediments are set into motion with current speeds of 15,8 cm/s (measured 50 cm above the bed) during the ebb tidal cycle.

Sediment dynamic on Saco do Limoeiro seems to be driving by two time-scales processes. During storm surges sediments could be transported by flood currents and during normal condition by ebb currents, and therefore it may be working as a source area for the sedimentation of Galheta's channel.

Previous papers and core and outcrop data allowed suggest that Ilha do Mel started as an emerged beach over a flood tidal delta at the beginning of the holocene sea level fall (≈ 5.100 years B.P.). Deposition on Saco do Limoeiro as a sand wave field, started after 2.850 ± 30 years B.P., over an erosive platform left behind by the erosion of the southern side of Ilha do Mel.

LISTA DE ABREVIATURAS

A. P. – Antes do presente.

ASSUMAR – Assessoria para Assuntos do Mar

APPA – Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina.

B.P. – Before present

CEM – Centro de Estudos do Mar.

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação.

DNOS – Diretoria Nacional de Obras de Saneamento.

FUNPAR – Fundação da Universidade Federal do Paraná

LOGEO – Laboratório de Oceanografia Geológica.

IPqM – Instituto de Pesquisas Oceanográficas da Marinha.

n.m.m. – Nível médio do Mar.

LISTA DE SÍMBOLOS

Ξ - Parâmetro de Yalin.

θ - Critério de Shields.

ρ_s - densidade do sedimento.

ρ - densidade do fluido.

ν - viscosidade cinemática do fluido.

D - diâmetro médio do sedimento.

g - aceleração da gravidade.

u_* - velocidade de cisalhamento.

u_z - velocidade da corrente medida a uma profundidade Z .

Z - profundidade de medição.

Z_0 - fator adimensional de rugosidade do fundo.

k - constante de Von Karmam.

λ - comprimento de onda de formas de fundo.

h - altura de formas de fundo.

ϕ - escala Phi de granulometria

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Resultados do processamento estatístico das amostras do fundo do Saco do Limoeiro. AMG – Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM – Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; M.O. – Matéria orgânica. **Pág. 20**

Tabela 6.1: Velocidades de correntes de marés no canal principal de enchente em períodos de vazante e enchente durante um ciclo de maré de sizígia. **Pág. 30**

Tabela 6.2: Velocidades de correntes de marés na rampa de enchente de enchente em períodos de vazante e enchente durante um ciclo de maré de sizígia. **Pág. 31**

Tabela 7.1: Resultados do processamento estatístico das amostras das sondagens no Saco do Limoeiro. AMG – Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM – Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; M.O. – Matéria orgânica. **Pág. 42**

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Foto aérea oblíqua do Saco do Limoeiro visto de noroeste para sudeste (cortesia de Alcimar da Silva Henrique/APPA). **Pág. 3**

Figura 4.2: Localização e vias de acesso ao Saco do Limoeiro, Ilha do Mel, Estado do Paraná. **Pág. 4**

Figura 4.3: Curvas de variação relativa do nível do mar propostas para o litoral paranaense (modificado de Lessa *et al.* 2000): a) Suguio *et al.* (1985); b) Angulo & Suguio (1995); e c) (envelope de variação) Angulo & Lessa (1997). Elevações em relação ao nível médio do mar. **Pág. 6**

Figura 4.4: a) Perfil estratigráfico transversal à planície costeira de Paranaguá; b) Perfil estratigráfico transversal detalhando a barreira holocênica (modificado de Lessa *et al.* 2000). Ver localização na figura 4.5. **Pág. 7**

Figura 4.5: Mapa ilustrando a geologia da planície costeira de Paranaguá conforme Angulo (1992), com a localização dos perfis estratigráficos, das sondagens geotécnicas, das sondagens por vibro-testemunhador e dos afloramentos. Os perfis topográficos da porção inferior direita da figura apresentam a diferença de elevação entre as duas partes da barreira holocênica (modificado de Lessa *et al.* 2000). **Pág. 8**

Figura 4.6: Imagem de satélite (Landsat 5 de 18/07/99) do complexo estuarino da Baía de Paranaguá. **Pág. 9**

Figura 5.1: Modelo da morfologia de deltas de maré enchente. As setas indicam a direção predominante das correntes de maré (modificado de Hayes, 1980). **Pág. 13**

Figura 5.2: Feições do Saco do Limoeiro identificadas por Angulo (1999). A) Canal principal de enchente. B) Rampa de enchente. C) Esporão de vazante. **Pág. 13**

Figura 5.3: Diagrama esquemático de quatro tipos de morfológicos de deltas de maré vazante resultantes da interação com a linha de costa (modificado de Hicks & Hume, 1996). **Pág. 14**

Figura 5.4: Diagrama de frequências do sentido de migração de ondas de areia (*sand waves*) intermareais apresentando predominância de orientações para o interior do estuário de Essex, Massachusetts (modificado de Hayes, 1980). **Pág. 15**

Figura 5.5: Direção de migração inferida das cristas de ondas de areia com comprimento de onda entre 50 e 200 m no Saco do Limoeiro. (1) planície costeira; (2) morros; (3) praia; (4) mangue; (5) direção das cristas; (6) direção de migração inferida das formas de fundo; (7) Direção predominante inferida de correntes de marés (Angulo 1999). **Pág. 16**

Figura 5.6: Direção de migração inferida das cristas de formas de fundo de primeira, segunda e terceira ordem no Saco do Limoeiro. (1) praia; (2) direção das formas de fundo de primeira ordem; (3) direção das formas de fundo de segunda ordem; (4) direção das formas de fundo de terceira ordem; (5) direção de migração inferida das formas de fundo; (6) limite aproximado do Saco do Limoeiro (Angulo 1999). **Pág. 16**

Figura 5.7: Detalhe de foto aérea vertical com as formas de fundo no Saco do Limoeiro. 1) Ondas de areia de primeira ordem. 2) Mega-ondulações de segunda ordem. 3) Mega-ondulações de terceira ordem (Angulo 1999). **Pág. 17**

Figura 5.8: Distribuição da média granulométrica dos sedimentos de fundo do Saco do Limoeiro. **Pág. 21**

Figura 5.9: Mapa de isóbatas de 1998 sobreposto ao mosaico de fotos aéreas de 1980 mostrando: o posicionamento dos perfis batimétricos; e os deslocamentos de formas de fundo e da posição do eixo do canal principal de enchente em 1998. **Pág. 22**

Figura 5.10: Perfis batimétricos orientados transversalmente às feições de fundo de maior porte, com direção NW-SE, mostrando as variações na amplitude das Feições A e B. Ver localização dos perfis na figura 5.9. **Pág. 23**

Figura 5.11: Perfis batimétricos orientados longitudinalmente às feições de fundo de maior porte e transversalmente às feições de fundo com menor porte, com direção SW-NE, mostrando a amplitude de uma feição de fundo de grande porte (Feições A), e as variações de amplitude das Feições B. Ver localização dos perfis na figura 5.9. **Pág. 24**

Figura 6.1: Gráfico proposto por Yalin (1972) onde a curva em linha sólida representa o limiar de movimentação de grão, sendo que a área acima dessa linha representa uma condição teórica de movimentação de grãos e a área abaixo representa uma condição teórica sem movimentação de grãos (modificado de Miller *et al.* 1977). **Pág. 28**

Figura 6.2: Gráfico mostrando a variação da maré, a variação das velocidades de correntes de maré e os momentos em que há transporte de sedimentos no canal principal de enchente do Saco do Limoeiro, durante um ciclo de maré de sizígia. **Pág. 31**

Figura 6.3: Gráfico com a variação de sentido e intensidade de correntes de maré durante um ciclo de maré de sizígia no canal principal de enchente. **Pág. 31**

Figura 6.4: Gráfico mostrando a variação da maré, a variação das velocidades de correntes de maré e os momentos em que há transporte de sedimentos na rampa de enchente do Saco do Limoeiro, durante um ciclo de maré de sizígia. **Pág. 32**

Figura 6.5: Gráfico com a variação de sentido e intensidade de correntes de maré durante um ciclo de maré de sizígia na rampa de enchente. **Pág. 32**

Figura 6.6: Percurso teórico de uma partícula em suspensão, durante um ciclo de maré completo no canal principal de enchente e na rampa de enchente. A escala dos vetores é três vezes menor para se ajustar à figura. **Pág. 33**

Figura 7.1: Variação granulométrica, estruturas sedimentares e fácies interpretadas (entre as setas à esquerda das colunas) nos testemunhos de sondagem (ver localização na figura 4.5). a) indiferenciado; b) face de praia; c) “*nearshore*”; d) face litorânea superior; e) canal estuarino; f) depósito de sobre-lavagem; g) planície de maré; h) delta de maré enchente (legenda aplicada também à figura 7.2). As estruturas sedimentares são sempre plano-paralelas, horizontais ou inclinadas (modificado de Lessa *et al.* 2000). **Pág. 36**

- Figura 7.2:** Variação granulométrica, estruturas sedimentares e fácies interpretadas (entre as setas à esquerda das colunas) nos afloramentos (ver localização na figura 4.5). Legenda para fácies sedimentares na figura 7.1. I) Estratificação plano-paralela; II) Estratificação cruzada planar; III) Estratificação cruzada tangencial na base; IV) Estratificação cruzada acanalada; V) Direção e ângulo de mergulho; VI) Conchas; VII) Detritos orgânicos; VIII) Tubos fósseis de *Callichirus sp.*; IX) Lentes de sedimentos grossos; X) Pequeno preenchimento de canal; XI) Laminações de lama nos foresets (modificado de Lessa *et al.* 2000). **Pág. 37**
- Figura 7.3:** Localização de sondagens geotécnicas, das sondagens com vibro-testemunhador, dos afloramentos descritos e do perfil transversal. **Pág. 38**
- Figura 7.4:** Detalhe de imagem de satélite (Landsat 5 de 18/07/99) ilustrando a planície arenosa ao lado do canal da DNOS em Pontal do Sul, e a posição da sondagem S8. **Pág. 38**
- Figura 7.5:** Operação de sondagem com vibro-testemunhador sobre uma forma de fundo aflorando na baixamar no Saco do Limoeiro. a) Perfuração utilizando o motor para acionar o vibrador de imersão vinculado ao tubo de sondagem. b) Recuperação do testemunho utilizando tripé e talha. **Pág. 39**
- Figura 7.6:** Operação de sondagem com amostrador em caixa a) Posicionado para penetração sem a tampa. b) Fechamento da tampa para a recuperação da amostra. **Pág. 40**
- Figura 7.7:** a) Vista panorâmica do afloramento A2 onde se observam os planos inclinados das estratificações cruzadas planares. b) Contato entre as estratificações plano-paralelas no topo (Unidade B) e as estratificações cruzadas planares na base (Unidade A) do afloramento A2. Para localização ver figura 7.3. **Pág. 43**
- Figura 7.8:** Representação esquemática, descrição e interpretação das estruturas sedimentares dos afloramentos A2 (1) e A4 (2). Para localização ver figura 7.3. **Pág. 44**
- Figura 7.9:** Estratificação cruzada truncada por onda evidenciada por truncamentos entre lâminas curvas, em decalque de adesivo epóxi no segmento da sondagem S5, com base a +0,5 m de elevação. **Pág. 45**
- Figura 7.10:** Estratificação cruzada evidenciada por lâminas inclinadas em até 20°, em decalque de adesivo epóxi, no segmento da sondagem S5, com base a -0,5 m de elevação. **Pág. 45**
- Figura 7.11:** Estratificação plano-paralela horizontal e sub-horizontal em decalque de adesivo epóxi no segmento da sondagem S6, com base a -0,6 m de elevação. **Pág. 45**
- Figura 7.12:** Representação esquemática, descrição e interpretação do afloramento A1 e da sondagem S5. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 46**
- Figura 7.13:** Representação esquemática, descrição e interpretação do afloramento A3 e da sondagem S6. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 47**
- Figura 7.14:** Representação esquemática, descrição e interpretação do afloramento A5 e da sondagem S7. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 48**
- Figura 7.15:** Perfis rasos obtidos com amostrador em caixa apresentando os primeiros 40 cm da camada de topo. As amostragens foram feitas na crista (a e b) e flanco dorsal (c e d) da forma de fundo onde se deram as sondagens S1 e S2 (ver localização na figura 7.3). **Pág. 49**
- Figura 7.16:** Estrutura heterolítica evidenciada por alternância entre porções sem forma definida de argila arenosa e areia fina. a) Segmento da sondagem S4 (elevação a -2,7 m). b) Segmento da sondagem S4 (elevação a -3,2 m). c) Segmento da sondagem S1 (elevação a -1,5 m). **Pág. 50**
- Figura 7.17:** Estrutura heterolítica evidenciada por estratos irregulares e deformados de argila arenosa na sondagem S4. a) Estratos inclinados e sinuosos (elevação a -2,1 m). b) Estratos descontínuos e curvados (elevação a -2,3 m). **Pág. 50**

Figura 7.18: Segmentos de sondagem apresentando a maneira de ocorrência dos estratos com concentração de conchas. a) Estrato de conchas mais espesso encontrado na sondagem S3 (elevação a cerca de -1,8 m). b) Estrato de conchas menos espesso encontrado na sondagem S1 (elevação a cerca de -1,8 m). **Pág. 51**

Figura 7.19: a) Segmentos de sondagem apresentando porções sem forma definida de areia argilosa, detritos vegetais e bolas de argila (segmento da sondagem S1 a -3,5 m de elevação). b) Detritos vegetais e bolas de argila (segmento da sondagem S2 a -3,2 m de elevação). c) Tubos fósseis, lentes de areia argilosa e detritos vegetais (segmento da sondagem S2 a +2,8 m). **Pág. 51**

Figura 7.20: Diferentes tipos de ocorrência de tubos fósseis. a) segmento da sondagem S4 a -4,2 m de elevação. b) segmento da sondagem S1 a -2,6 m de elevação. c) Segmento da sondagem S2 a -2,9 m de elevação. **Pág. 52**

Figura 7.21: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S1. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 52**

Figura 7.22: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S2. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 53**

Figura 7.23: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S3. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 53**

Figura 7.24: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S4. Ver localização na figura 7.3. **Pág. 54**

Figura 7.25: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S8. Ver localização na figura 7.3 e 7.4. **Pág. 55**

Figura 7.26: Registro sedimentar previsto para dunas subaquosas e ondas de areia. O autor separou duas classes de ondas de areia e dunas subaquosas distintas pela ocorrência ou não de separação do fluxo sobre seus foresets. O fluxo não separado ocorre onde há uma suave declividade nos foresets. (modificado de Allen, 1980). **Pág. 58**

Figura 7.27: Perfil estratigráfico transversal ao setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá, com unidades sedimentares interpretadas para a barreira holocênica e seu limite inferior marcado por sedimentos paleo-estuarinos representados nas sondagens 11, 14 e 23 obtidas em Lessa *et. al.* (2000). Para localização ver figura 7.3). **Pág. 60**

Figura 7.28: Modelo de evolução geomorfológica da enseada do Saco do Limoeiro. **Pág. 61**

Figura 7.29: Desembocadura de Whangarei Harbour na Ilha Norte, Nova Zelândia onde desenvolveram-se feições batimétricas semelhantes as encontradas no Saco do Limoeiro (Black & Healey, 1986). **Pág. 62**

1. INTRODUÇÃO

A desembocadura sul da Baía de Paranaguá possui um importante papel no desenvolvimento econômico e social do Estado do Paraná, pois nela foi dragado o Canal da Galheta, que dá acesso ao porto de Paranaguá. Seu potencial para atividades de veraneio e turismo é revelado pela recente instalação dos terminais turísticos de Pontal do Sul e Ilha do Mel. O acesso de embarcações ao terminal turístico da Ilha do Mel se dá através de um canal dragado sobre uma extensa área rasa de águas calmas, denominada Saco do Limoeiro, objeto desse estudo.

Em áreas próximas à desembocaduras os fenômenos de erosão e sedimentação são mais expressivos do que em outras áreas costeiras, pois estão sujeitos a uma complexa interação de agentes naturais como: marés, correntes de maré, ondas, e correntes de deriva litorânea. O assoreamento de canais de navegação e deslocamentos da linha de costa são consequências frequentes desse fenômeno. São exemplos locais a linha de costa em Pontal do Sul e Ilha do Mel, assim como o Canal da Galheta que é dragado regularmente devido a problemas de assoreamento.

Os problemas de assoreamento no Canal da Galheta foram recentemente estudados por Lamour (2000), que calculou taxas de assoreamento e interpretou a dinâmica sedimentar na desembocadura sul da Baía de Paranaguá, com base principalmente em levantamentos batimétricos e análise de sedimentos. Angulo (1999) identificou feições deposicionais associadas a desembocaduras no litoral paranaense com base em fotografias aéreas, caracterizando morfologicamente o Saco do Limoeiro, e interpretando-o como sendo um hemi-delta de maré enchente.

Essas interpretações serviram de hipótese inicial para o desenvolvimento desta dissertação, que complementa o conhecimento dos processos de sedimentação que atuam no Saco do Limoeiro e no setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como meta complementar o conhecimento a respeito dos processos sedimentares que atuam no Saco do Limoeiro, visando caracterizar sua dinâmica sedimentar, sua evolução paleogeográfica e sua relação com o Canal da Galheta.

Especificamente este trabalho tem os seguintes objetivos:

- a) Caracterizar os sedimentos e formas de fundo que ocorrem no Saco do Limoeiro.
- b) Identificar mudanças na morfologia do fundo nos últimos 18 anos.
- c) Determinar a intensidade e direção de correntes de marés, e em que situações ocorre o transporte de sedimentos não-coesivos por tração, durante um ciclo de maré de sizígia em condições de mar calmo.
- d) Identificar e nivelar estruturas sedimentares em relação ao nível médio do mar, para interpretar ambientes de sedimentação e a evolução paleogeográfica do Saco do Limoeiro e Ilha do Mel.
- e) Caracterizar a dinâmica sedimentar no Saco do Limoeiro e sua relação com o setor interno da desembocadura da Baía de Paranaguá, onde foi dragado o Canal da Galheta.

3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação apresenta inicialmente um capítulo de caracterização regional, com a localização e acessos à área de estudo, as características da planície costeira paranaense e do complexo estuarino da Baía de Paranaguá, além dos fatores oceanográficos com maior influência na região.

Os três capítulos seguintes foram elaborados prevendo sua publicação na forma de artigos, sendo que cada um deles contém revisão bibliográfica, metodologia, resultados e discussões.

Em seguida é apresentada uma discussão sobre a dinâmica sedimentar no Saco do Limoeiro e sua relação com o Canal Galheta no setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá. Um capítulo de conclusões finaliza a dissertação.

4. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL

4.1. Localização e acesso à área de estudo

A área de estudo localiza-se na planície costeira paranaense que está entre os paralelos 25°S e 26°S, tendo a Serra do Mar como limite a oeste, e o Oceano Atlântico a leste. Aproximadamente na latitude 25°45'S, está a Ilha do Mel dividindo a desembocadura do complexo estuarino da Baía de Paranaguá em Canal Norte e Canal da Galheta a sul da ilha.

O objeto desse estudo encontra-se junto à margem sudoeste da Ilha do Mel, fazendo face ao Canal da Galheta na desembocadura sul da Baía de Paranaguá, onde existe um embaçamento com águas calmas e profundidades médias de 1 m, denominado Saco do Limoeiro ou Mar de Dentro (Figura 4.1). Tem forma de meia-gota com cerca de 10 km², sendo seu lado retilíneo delineado arbitrariamente por uma isóbata de 2 m, e seu lado convexo formado pela margem sudoeste da Ilha do Mel.



Figura 4.1: Foto aérea oblíqua do Saco do Limoeiro visto de noroeste para sudeste (cortesia de Alcimar da Silva Henrique/APPA).

O acesso mais comum à área de estudo é através de embarcações que fazem regularmente o trajeto entre os terminais turísticos, de Paranaguá ou de Pontal do Sul no Município de Pontal do Paraná, e o terminal da Ilha do Mel na Praia da Brasília (Figura 4.2).

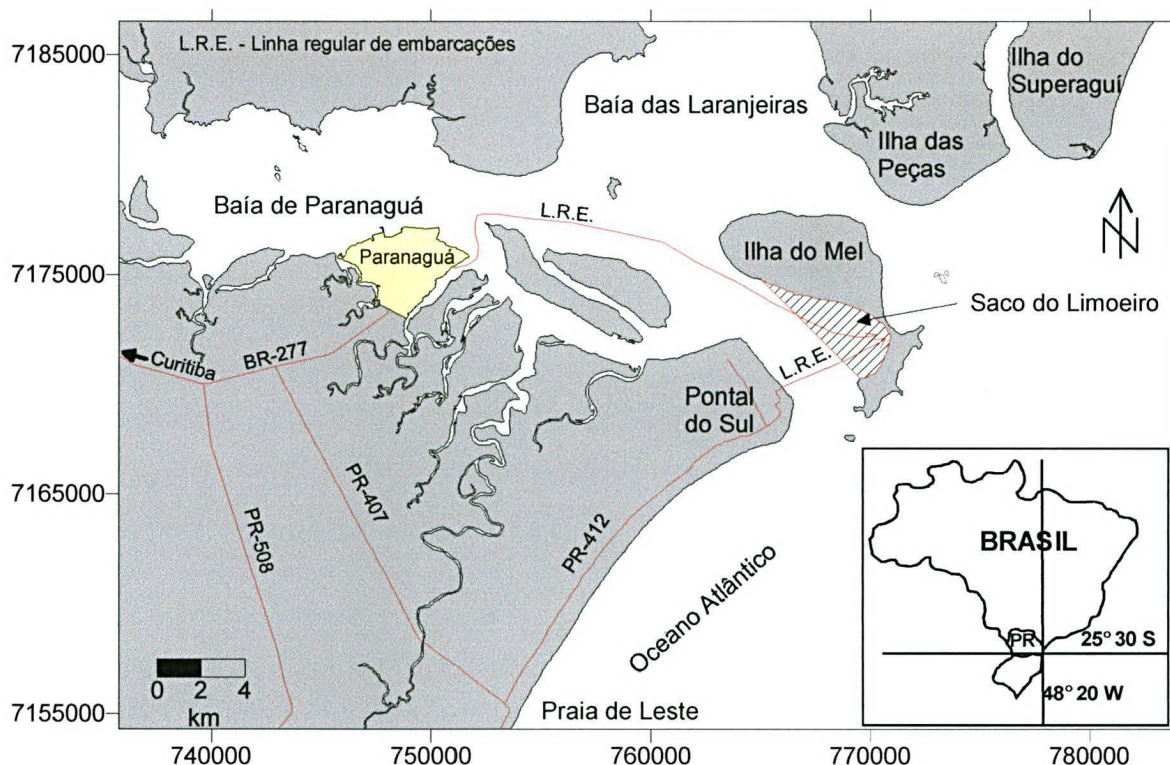


Figura 4.2: Localização e vias de acesso ao Saco do Limoeiro, Ilha do Mel, Estado do Paraná.

4.2. Geologia e evolução da planície costeira paranaense

A geologia da planície costeira paranaense foi estudada primeiramente por Bigarella (1946). Desde então muitos trabalhos foram publicados, culminando com o abrangente trabalho de Angulo (1992), que traz uma completa revisão bibliográfica sobre este tema. Este autor mapeou ambientes de sedimentação e unidades geomorfológicas da planície costeira paranaense em escala 1:50.000 e 1:100.000, e investigou paleoníveis marinhos com base em indicadores sedimentares e biológicos.

Segundo Angulo (1992), a porção mais larga da planície costeira paranaense possui cerca de 55 km, na latitude de Paranaguá, desde o sopé da Serra do Mar até o Oceano Atlântico. Seu comprimento é de aproximadamente 90 km no Paraná, tendo como limite sul o sistema estuarino do Rio Saí-Guaçu, e norte o sistema estuarino do Mar de Arapira. Está intensamente recortada pelos complexos estuarinos da Baía de Paranaguá, de Guaratuba, das Laranjeiras e dos Pinheiros, o que implica a presença de inúmeras ilhas como a Ilha do Mel, das Peças e do Superagui.

A planície costeira paranaense é composta por sedimentos quaternários depositados em ambientes continentais e marinhos, mas morros e colinas isolados

formados por migmatitos, diques de diabásio ou até sedimentos terciários também estão presentes. Os sedimentos continentais são em geral cascalhos sustentados por matriz areno-argilosa, que ocorrem próximos ao sopé das serras, na forma de depósitos associados a vertentes como leques, tálus e colúvios. Os sedimentos marinhos são compostos geralmente por areias finas a muito finas, bem selecionadas e predominantemente quartzosas, depositadas em feixes de cordões litorâneos paralelos à direção da praia atual (SW-NE). Estes feixes de cordões litorâneos ocorrem em terraços com altitudes que decrescem em direção ao oceano. Na região de Paranaguá as altitudes dos terraços variam entre 12 m e 6 m e em Pontal do Sul entre 4,6 m e 1,8 m. Ocorrem ainda sedimentos arenosos e areno-argilosos, interpretados como sendo sedimentos paleoestuarinos depositados em porções baixas e no fundo de antigos vales fluviais (Angulo, 1992).

Segundo Suguio *et al.* (1985), variações do nível relativo do mar ocorridas durante o Quaternário condicionaram a evolução paleogeográfica das planícies costeiras brasileiras. Estes autores reconstituíram as curvas de variação relativa do nível do mar nos últimos 7.000 anos em diversas porções do litoral brasileiro. Encontraram uma situação de submersão da costa até cerca de 5.150 anos A.P., seguida de uma emersão progressiva. A curva proposta para a região de Paranaguá apresenta duas oscilações negativas depois do máximo transgressivo de 5.100 anos A.P.; uma há 4.600 anos A.P.; e outra há 2.500 anos A.P. aproximadamente. Porém, segundo Angulo & Lessa (1997), tais oscilações não teriam ocorrido e propõem um envelope de variação para o nível relativo do mar nos últimos 6.000 anos (Figura 4.3). Angulo & Souza (1999) fizeram uma revisão dos trabalhos relacionados as curvas de variação do nível do mar considerando o nível de precisão dos dados e concluíram que no período entre 5.000 e 5.400 A.P. o nível relativo do mar esteve entre 2,5 e 4,0 m acima do atual.

Lessa *et al.* (2000) interpretaram a planície costeira de Paranaguá como sendo dois sistemas de barreira - laguna, que tiveram sua evolução controlada pelas duas últimas transgressões (Transgressão Cananéia em 120.000 A.P. e Transgressão Santos em 5.100 A.P.), correspondentes aos dois últimos períodos interglaciais do Quaternário. Identificaram as seguintes unidades: barreira holocênica transgressiva, barreira holocênica regressiva, estuário holocênico, canal estuarino holocênico, sedimentos continentais cenozóicos, estuário pleistocênico, barreira pleistocênica e embasamento cristalino (Figura 4.4 e localização na Figura 4.5).

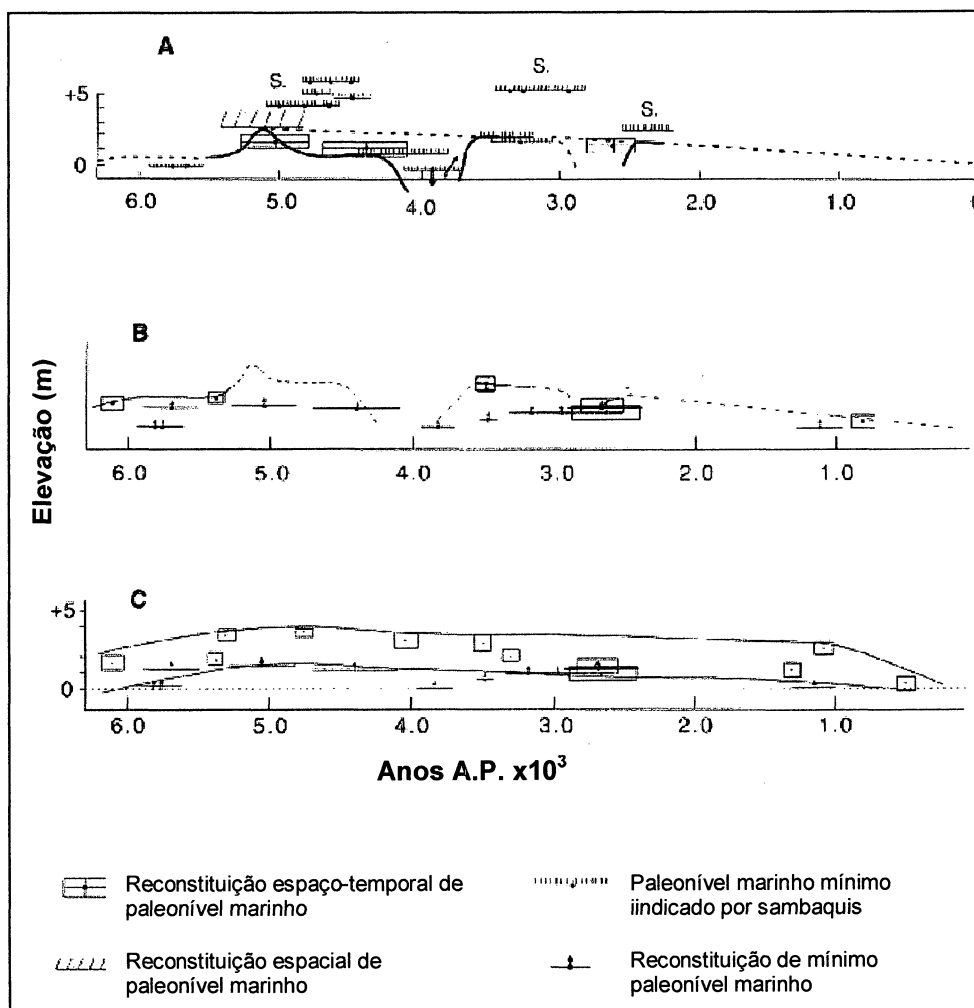


Figura 4.3: Curvas de variação relativa do nível do mar propostas para o litoral paranaense (modificado de Lessa *et al.* 2000): a) Suguio *et al.* (1985); b) Angulo & Suguio (1995); e c) (envelope de variação) Angulo & Lessa (1997). Elevações em relação ao nível médio do mar.

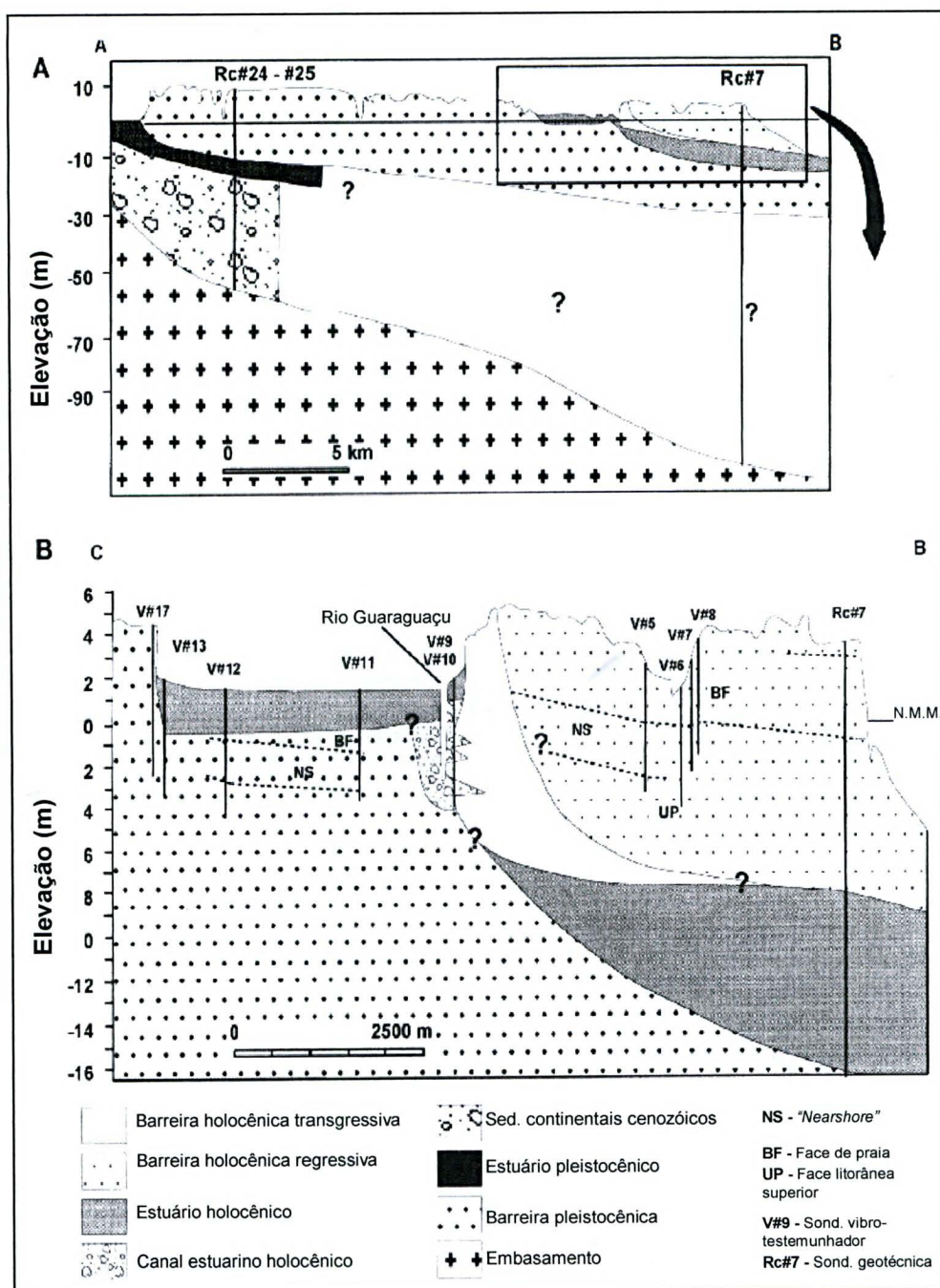


Figura 4.4: a) Perfil estratigráfico transversal à planície costeira de Paranaguá; b) Perfil estratigráfico transversal detalhando a barreira holocênica (modificado de Lessa *et al.* 2000). Ver localização na figura 4.5.

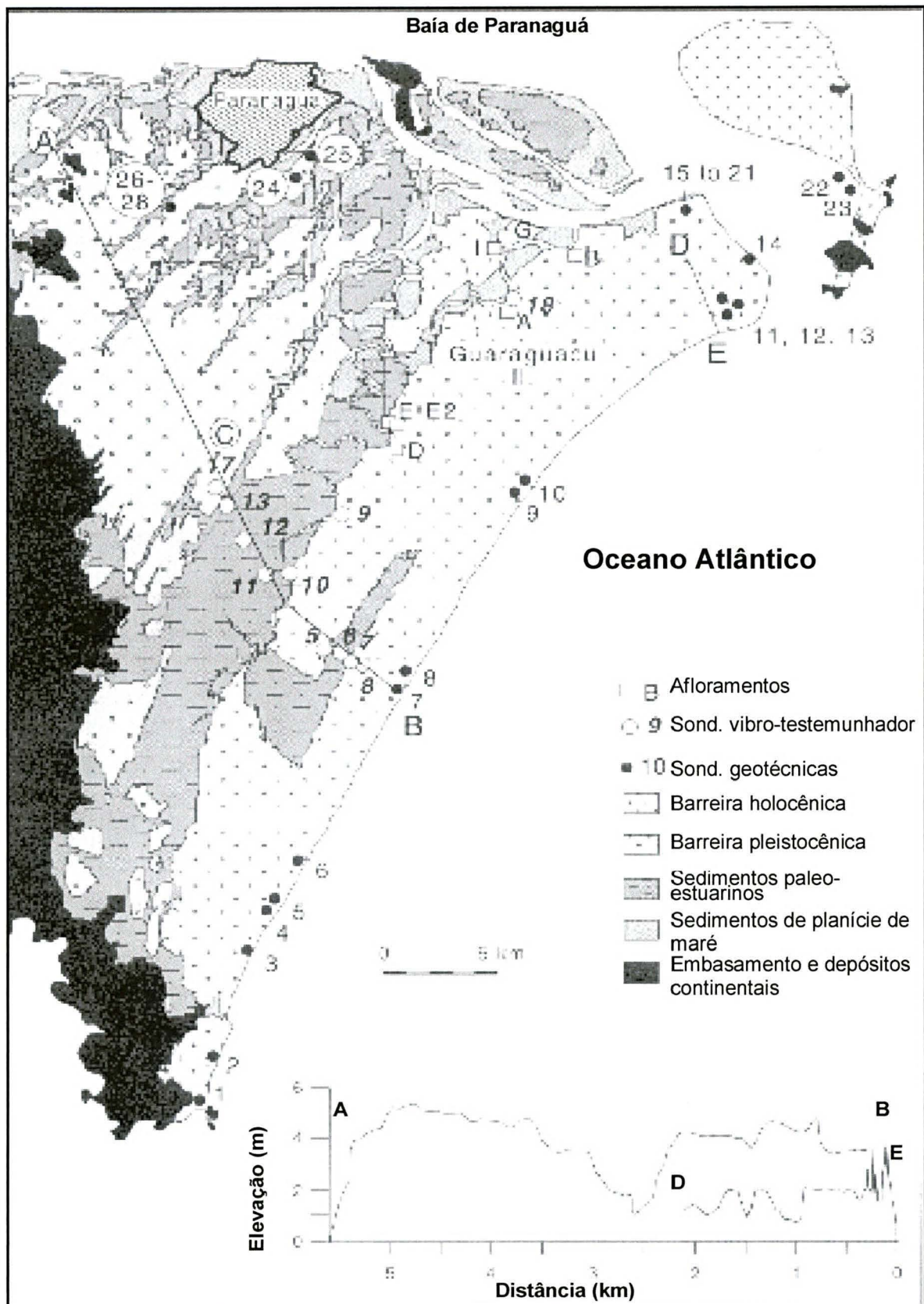


Figura 4.5: Mapa ilustrando a geologia da planície costeira de Paranaguá conforme Angulo (1992), com a localização dos perfis estratigráficos, das sondagens geotécnicas, das sondagens por vibro-testemunhador e dos afloramentos. Os perfis topográficos da porção inferior direita da figura apresentam a diferença de elevação entre as duas partes da barreira holocênica (modificado de Lessa *et al.* 2000).

4.4. O complexo estuarino da Baía de Paranaguá

O complexo estuarino da Baía de Paranaguá localiza-se na porção norte da planície costeira paranaense. Possui dois eixos principais: um eixo orientado no sentido E-W, ocupado pelas baías de Paranaguá e Antonina; e outro orientado no sentido NNE-SSW, ocupado pelas Baía das Laranjeiras. Estes dois eixos estão separados pela Ilha do Mel na desembocadura da baía. Ocorre ainda um eixo secundário, entre a Ilha das Peças e Ilha do Superagüi, denominado Baía dos Pinheiros, que desagua no oceano pelo Canal do Superagüi (Figura 4.6).

A Baía de Paranaguá é um estuário parcialmente misturado do Tipo B, com superfície líquida de 601 km² e volume de aproximadamente 2x10⁹ m³. Drena aproximadamente 70% da área da bacia hidrográfica litorânea do Estado do Paraná denominada Bacia Atlântica (Mantovanelli, 1999; Knoppers *et al.*, 1987).

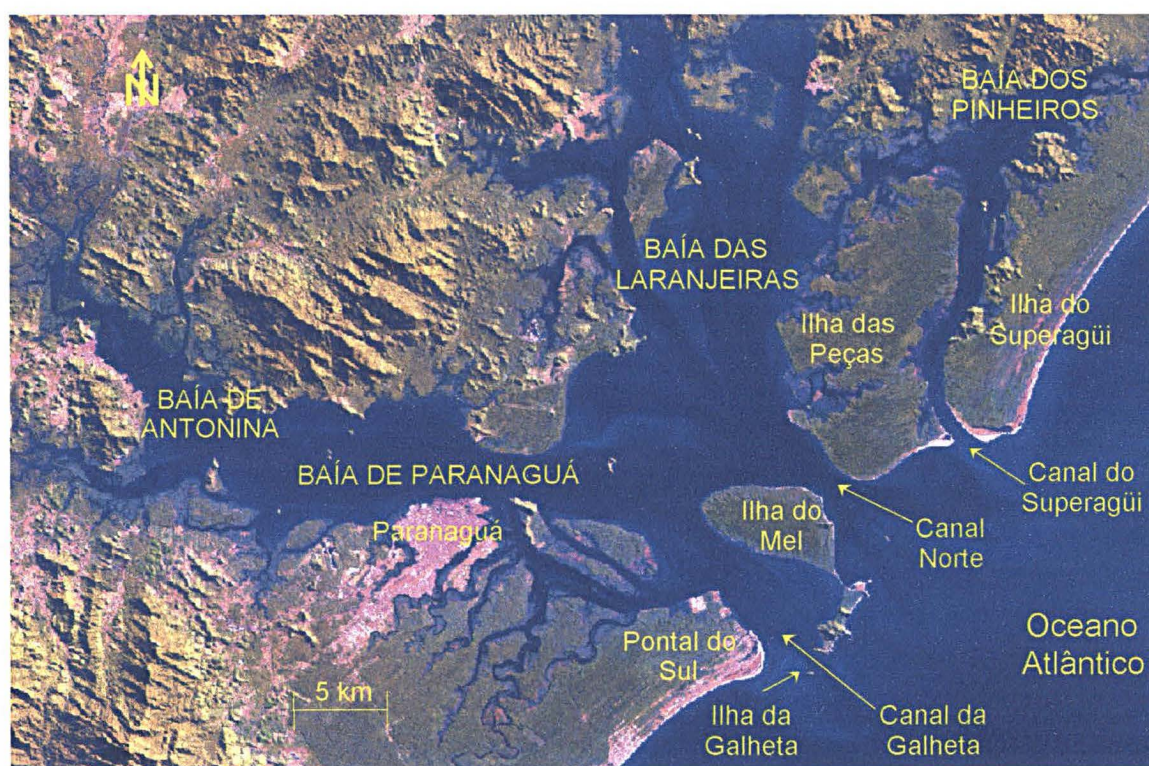


Figura 4.6: Imagem de satélite (Landsat 5 de 18/07/99) do complexo estuarino da Baía de Paranaguá.

4.5. Fatores oceanográficos

Informações que caracterizem o regime de ondas ainda são deficientes para o litoral paranaense devido a escassez de dados. Bandeira (1972) utilizando dados levantados durante um ano a uma profundidade aproximada de 10 m, entre a Ilha dos Currais e a Praia de Leste (PR), fez uma análise estatística e observou que as ocorrências mais freqüentes são de ondas com alturas máximas de 1 m e com altura significativa de 0,8 m. Os períodos mais freqüentes medidos foram entre 5 s e 6 s. O sentido de propagação mais freqüente é de SE para NW, independentemente de períodos e alturas.

Portobrás (1983) também produziu dados entre a Ilha dos Currais e Praia de Leste de agosto de 1982 a janeiro de 1984. Identificaram duas direções preferenciais de propagação de ondas (ENE e SSE/SE), sendo que as ondas mais altas vieram do quadrante SE, e foram relacionadas à passagem de frentes frias. As ondas provenientes do quadrante ENE foram relacionadas à atuação de ventos associados ao anticiclone tropical do Atlântico Sul. Os valores médios mensais para a altura máxima variaram entre 2 m e 4 m. Da mesma forma a altura significativa variou entre 1,5 m e 2,5 m, e os períodos médios entre 9,8 s e 16,5 s. É interessante lembrar que tanto o levantamento de Bandeira (1972) quanto o da Portobrás (1983) foram feitos num local sob influência de efeitos de difração, ocasionados pela Ilha do Currais, e também pelo efeito de refração por atrito com a plataforma interna.

Marone *et al.* (1997) executaram medições entre a Ilha da Galheta e Pontal do Sul, num período de verão (17/01/97 e 06/02/97) e num de inverno (14/08/97 e 19/08/97). No período de verão as ondas apresentaram alturas significativas menores que 0,5 m e períodos na ordem de 7 s. No período de inverno as ondas apresentaram alturas significativas menores que 0,4 m e períodos na ordem de 5 s. Em ambas as medições as ondas eram provenientes de S-SE. Estas medições foram efetuadas numa posição relativamente abrigada, significando que os valores obtidos refletem as características de ondas que adentram o estuário, perdendo energia por atrito com os bancos arenosos associados a desembocadura do Canal da Galheta.

Segundo Marone & Jamiyanaa (1997), as marés medidas no Canal da Galheta apresentam amplitudes médias de 1,4 m em períodos de quadratura e de 1,7 m em períodos de sizígia, caracterizando um regime de micromarés. São do tipo semi-diurnas por ocorrerem duas preamares e duas baixa-mares por dia, porém,

interações não-lineares podem levar a ocorrência de até seis preamares e seis baixa-mares por dia em períodos de quadratura.

Em Bigarella *et al.* (1978) e Knoppers *et al.* (1987) encontram-se referências aos primeiros dados relativos a correntes de maré na Baía de Paranaguá, levantados pelo Instituto de Pesquisas Oceanográficas da Marinha (IPqM). Recentemente Marone *et al.* (1997) realizaram medições no Canal da Galheta e determinaram que as velocidades máximas de correntes de marés são de 59 cm/s com rumo 320° nos períodos de enchente, e de 97 cm/s com rumo 140° nos períodos de vazante.

Vale ressaltar que a maioria das medições de marés e correntes de marés citadas foi realizada em períodos de mar calmo, e que situações com maior energia podem ocorrer. Segundo Marone & Camargo (1994) uma dessas situações é conhecida como “ressaca” (*storm surges*), e ocorre associada a marés meteorológicas. Marés meteorológicas ocasionam uma elevação do nível do mar devido principalmente a variações de pressão atmosférica e troca de *momentum* entre a atmosfera e o mar durante a passagem de frentes frias. Uma maré meteorológica observada em 18 de agosto de 1994 ocasionou uma elevação de 80 cm acima do nível da maré previsto para aquele dia, o que significou um volume de água represada na Baía de Paranaguá estimado em $4,8 \times 10^8 \text{ m}^3$. Eventos como esse têm grande influência nas correntes de marés e também aumentam o poder de destruição das ondas que atingem a costa.

5. CARACTERIZAÇÃO DO SACO DO LIMOEIRO

5.1. Revisão bibliográfica

O Saco do Limoeiro é um depósito sedimentar subaquático associado a desembocadura sul do complexo estuarino da Baía de Paranaguá, que foi interpretado por Angulo (1995,1999) como sendo um hemi-delta de maré enchente.

5.1.1. Deltas de maré

Trabalhos sobre depósitos sedimentares subaquáticos associados a desembocaduras estão disponíveis na literatura (Finley, 1975,1978; Oertel, 1975; Hubbard *et al.*1979; Boothroyd, 1978), porém, geralmente estão relacionados a sistemas ativos de barreira - laguna, que são comuns no hemisfério norte. No entanto, alguns dos modelos propostos possuem elementos correlacionáveis com os exemplos paranaenses que são produto da evolução de antigos sistemas barreira - laguna.

Hayes (1975,1980), propõe uma terminologia aceita mundialmente para depósitos sedimentares subaquáticos associados a desembocaduras. Identificou quatro elementos principais denominados delta de maré vazante, delta de maré enchente, esporões recurvados e seqüência de preenchimento de canal. Para o estudo do Saco do Limoeiro destaca-se o seguinte conceito e descrição desse autor para deltas de maré enchente:

Deltas de maré enchente (*flood-tidal deltas*) são formados por sedimentos depositados por correntes de maré enchente junto a desembocaduras no interior de estuários. As feições que o compõem são as seguintes: a) rampa de enchente (*flood-ramp*) é um corpo arenoso que mergulha em direção ao oceano e sobre o qual as correntes de enchente são forçadas; b) canais de enchente (*flood channels*) são canais dominados por correntes de enchente e que geralmente se bifurcam na rampa de enchente; c) escudo de enchente (*ebb-shields*) elevações arenosas que ocorrem às margens do delta de maré e o protegem das correntes de vazante; d) esporão de vazante (*ebb-spit*) é formado por correntes de vazante; e) lobos de derramamento (*spillover lobes*) são barras liguóides que se formam sobre o escudo de vazante como resultado da ação de correntes de maré vazante (Figura 5.1).

Angulo (1999) reconheceu no Saco do Limoeiro algumas das feições descritas por Hayes (1980), como o canal de enchente, a rampa de enchente e o esporão de vazante (Figura 5.2).

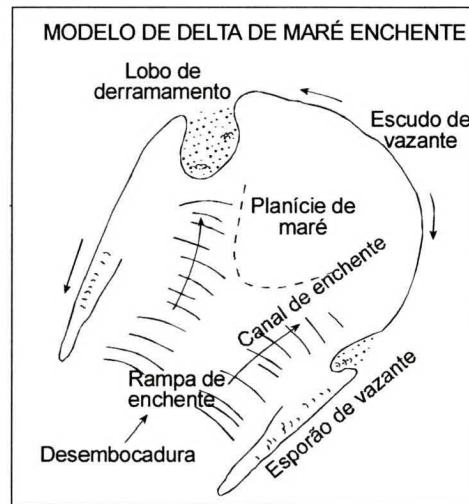


Figura 5.1: Modelo da morfologia de deltas de maré enchente. As setas indicam a direção predominante das correntes de maré (modificado de Hayes, 1980).

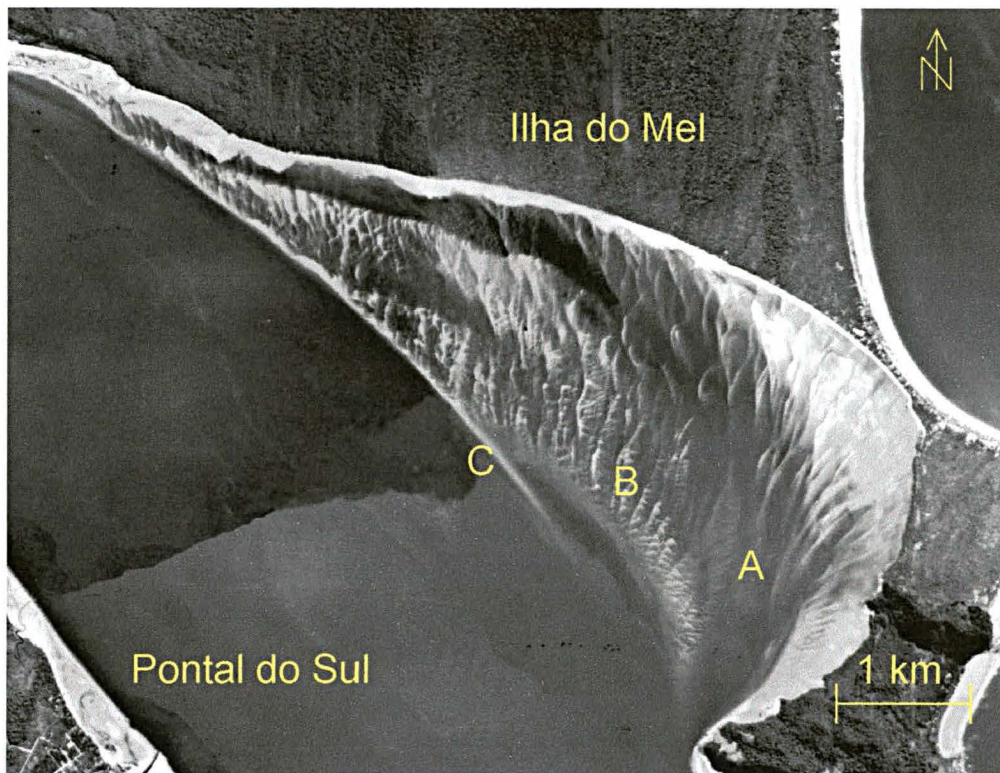


Figura 5.2: Feições do Saco do Limoeiro identificadas por Angulo (1999). A) Canal principal de enchente. B) Rampa de enchente. C) Esporão de vazante.

Segundo Davies (1994), deltas de maré enchente são pouco afetados por ondas e correntes de deriva litorânea pois desenvolvem-se no interior de estuários.

Entretanto, sofrem grande influência de correntes de maré enchente assim como de correntes de maré vazante. Desta forma, sua morfologia depende muito do regime de marés da região, assim como da forma do corpo aquoso onde ele se desenvolve.

Hicks & Hume (1996) estudaram a morfologia de deltas de maré vazante associados a 17 desembocaduras de mar aberto; e em enseadas de costas da Ilha Norte na Nova Zelândia. Identificaram quatro tipos morfológicos decorrentes principalmente da configuração da linha de costa adjacente. Os tipos identificados são os seguintes: a) Deltas de forma livre (*Free form deltas*) possuem forma de asa de morcego e ocorrem em costas de mar aberto; b) Deltas constritos (*Constricted deltas*) ocorrem onde o ângulo da linha de costa e a falta de espaço impede o desenvolvimento completo do tipo anterior; c) Meio-deltas de alto ângulo (*High angle half-deltas*) têm tipicamente a forma de “L”, desenvolvem-se normais à costa e ocorrem onde existe um pontal rochoso em um dos lados da desembocadura, que desvia o fluxo de vazante gerando acumulações apenas no outro lado da desembocadura; d) Meio-deltas de baixo ângulo (*Low-angle half-deltas*) são sub-paralelos a linha de costa devido um desvio do fluxo de vazante forçado por controle rochoso (Figura 5.3).

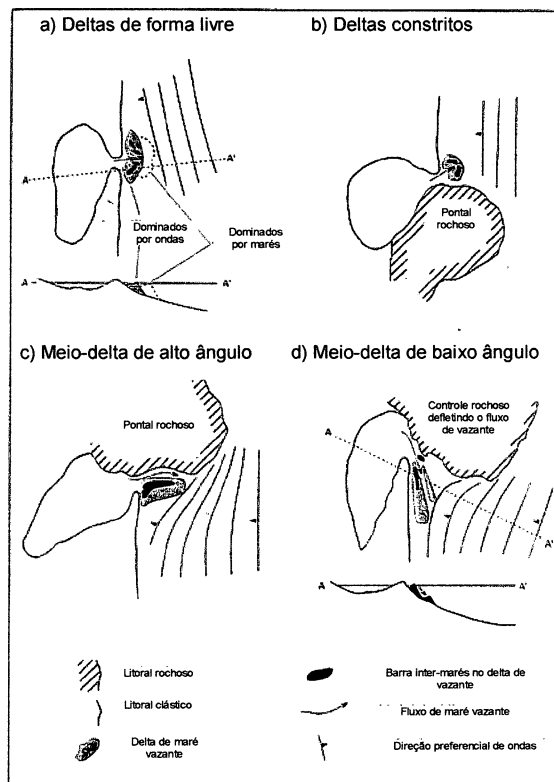


Figura 5.3: Diagrama esquemático de quatro tipos de morfologias de deltas de maré vazante resultantes da interação com a linha de costa (modificado de Hicks & Hume, 1996).

5.1.2. Formas de fundo em deltas de maré enchente

Conforme Boothroyd & Hubbard (1975, *apud* Hayes 1980), ondas de areia (*sand waves*) com sentidos de migração orientados para o interior do estuário são comuns em deltas de maré enchente com profundidades menores que 2 m abaixo do nível médio do mar, com velocidades de correntes de marés inferiores a 80 cm/s e grande assimetria de maré (Figura 5.4).

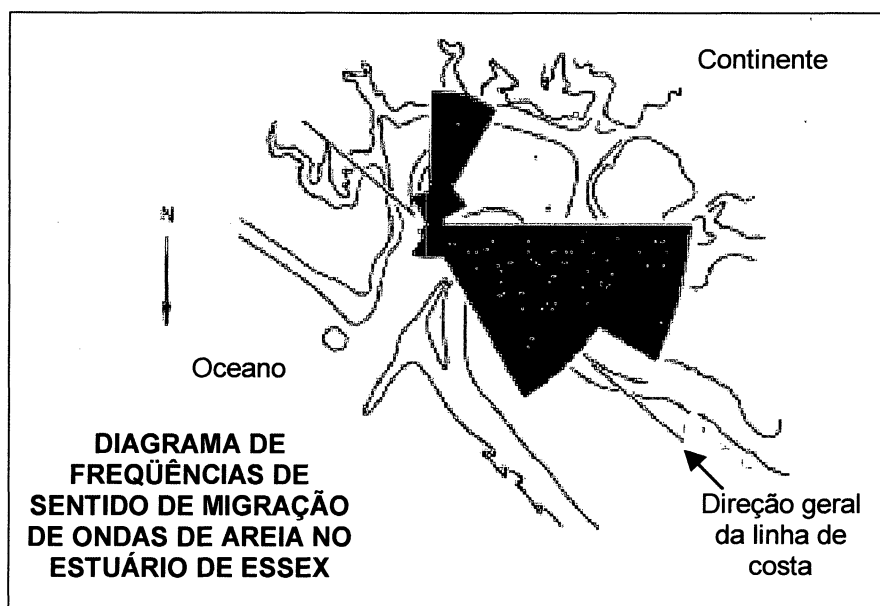


Figura 5.4: Diagrama de frequências do sentido de migração de ondas de areia (*sand waves*) intermareais apresentando predominância de orientações para o interior do estuário de Essex, Massachusetts (modificado de Hayes, 1980).

Angulo (1999) identificou sistemas de formas de fundo com pelo menos três ordens de grandeza. As formas de primeira ordem foram descritas como ondas de areia (*sand waves*) com comprimento de onda entre 50 e 200 m e com cristas orientadas entre NNE e NNW, segundo fluxos de enchente (Figura 5.5). No dorso dessas ondas de areia, foram identificadas mega-ondulações (*megaripples*) de segunda ordem, com comprimento de onda entre 10 e 50 m, orientadas entre E e NE, o que indicaria ação de fluxos secundários de correntes de maré enchente por entre as ondas de areia. Ocorrem também mega-ondulações de terceira ordem, com comprimento de onda de cerca de 10 m orientadas entre SSW-NNE e SW-NE, o que indicaria ação de correntes de maré vazante (Figuras 5.6 e 5.7).

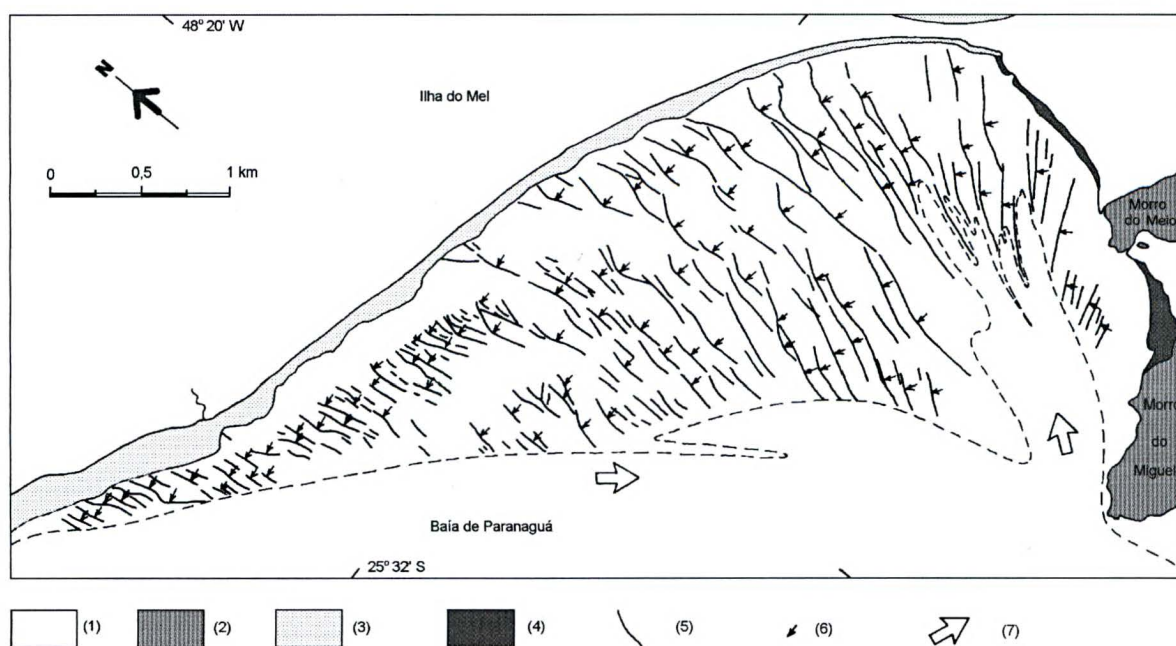


Figura 5.5: Direção de migração inferida das cristas de ondas de areia com comprimento de onda entre 50 e 200 m no Saco do Limoeiro. (1) planície costeira; (2) morros; (3) praia; (4) mangue; (5) direção das cristas; (6) direção de migração inferida das formas de fundo; (7) Direção predominante inferida de correntes de marés (Angulo 1999).

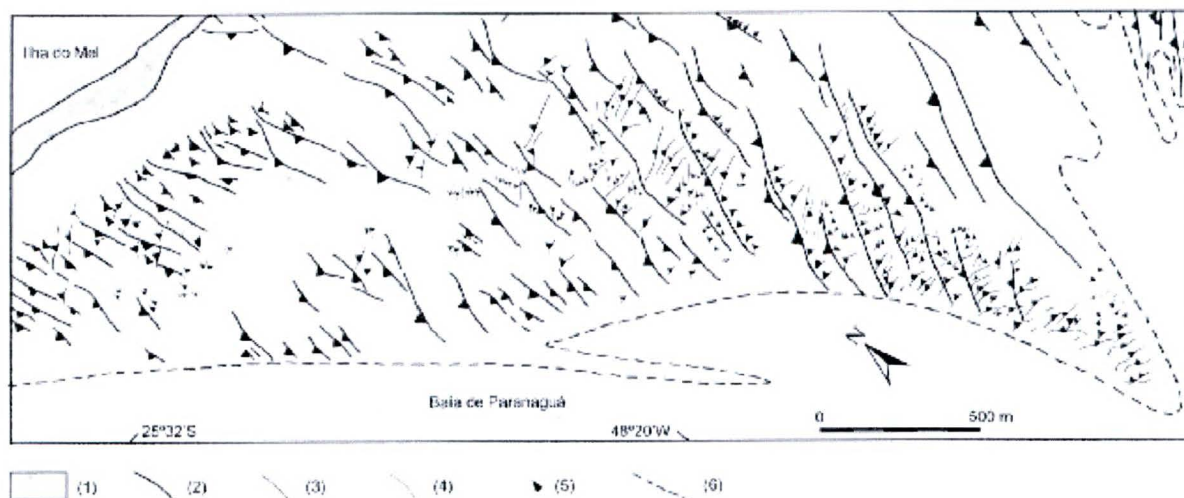


Figura 5.6: Direção de migração inferida das cristas de formas de fundo de primeira, segunda e terceira ordem no Saco do Limoeiro. (1) praia; (2) direção das formas de fundo de primeira ordem; (3) direção das formas de fundo de segunda ordem; (4) direção das formas de fundo de terceira ordem; (5) direção de migração inferida das formas de fundo; (6) limite aproximado do Saco do Limoeiro (Angulo 1999).

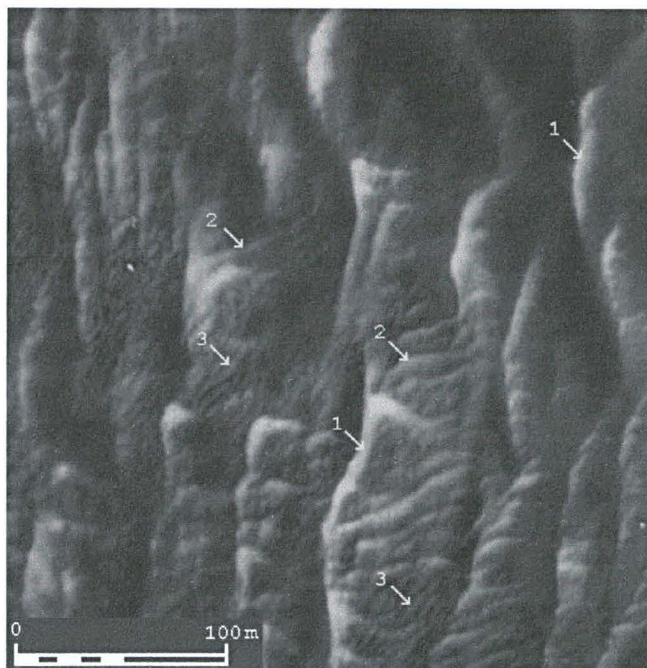


Figura 5.7: Detalhe de foto aérea vertical com as formas de fundo no Saco do Limoeiro. 1) Ondas de areia de primeira ordem. 2) Mega-ondulações de segunda ordem. 3) Mega-ondulações de terceira ordem (Angulo 1999).

5.2. Meios e métodos

Para a caracterização do Saco do Limoeiro foram utilizados os seguintes procedimentos: a) amostragem de sedimentos de fundo; b) determinação das alturas de formas de fundos através da análise de um levantamento batimétrico; c) comparação entre um levantamento batimétrico de 1998 e um mosaico de fotos aéreas de 1980 para a identificação de mudanças na configuração do fundo.

O levantamento batimétrico foi realizado em 1998 pela Microars Consultoria e Projetos para a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Esse levantamento mapeou em escala 1:2.000, com pontos espaçados em cerca de 8 m em linhas espaçadas em cerca de 20 m, o canal de acesso ao Terminal Turístico da Ilha do Mel na Praia da Brasília. Abrange uma faixa de 1.500 m de largura que se estende desde o trapiche de atracação até o final do baixio do Saco do Limoeiro onde a declividade aumenta, passando abruptamente da isóbata de 2 m para a de 12 m.

No mosaico de fotos aéreas utilizou-se as mesmas fotos (51404; 51405; 51406; 51462; 51463; 51464; 51465) do levantamento, em escala 1:25.000 de 1980, utilizado por Angulo (1995,1999). O mosaico foi montado no programa Adobe Photoshop e georreferenciado no programa ER Mapper. Esse mosaico serviu de base para a sobreposição do mapa de isóbatas gerado no levantamento batimétrico de 1998, onde feições de fundo são delineadas em padrões relacionáveis aos

observados nas fotos aéreas, propiciando uma comparação entre dois momentos com lapso de tempo de 18 anos.

Esta sobreposição serviu também para a orientação de seis perfis batimétricos transversais a feições de fundo correlacionáveis com os três tipos de formas de fundo descritas por Angulo (1995,1999) (Figura 5.7). Três perfis estão orientados no sentido NW-SE, posicionados transversalmente ao que seriam as formas de fundo de primeira ordem, interpretadas como sendo ondas de areia. Outros três perfis estão orientados no sentido SW-NE, longitudinais às formas de fundo de primeira ordem, e transversais às que seriam formas de fundo de segunda e terceira ordem, interpretadas anteriormente como sendo mega ondulações.

Também foram identificadas formas de fundo com mais de 20 m de comprimento de onda através de variações na ordem de 20 cm no registro de um ecobatímetro portátil (EAGLE 240) para atividades pesqueiras. A pouca profundidade na área de estudo possibilitou a observação do fundo através de mergulho livre apesar da visibilidade limitada. Nestes mergulhos também foram obtidas uma amostra na cava e outra na crista de uma das formas de fundo identificadas pelo ecobatímetro.

A amostragem dos sedimentos de fundo foi feita em 25 pontos com amostrador tipo busca-fundo modelo Petite Ponar. As porções no extremo leste e extremo oeste da área não foram amostradas devido a limitações com o calado de embarcações. Estas amostras passaram por análises granulométricas e análises para determinação de teores de matéria orgânica e de carbonato de cálcio (CaCO_3).

O processamento das amostras para a determinação das frações granulométricas, foi executado no Laboratório de Oceanografia Geológica do Centro de Estudos do Mar (LOGEO-CEM) conforme o seguinte procedimento:

- a) Secagem das amostras em estufa à temperatura de 60°C;
- b) Elutriação de cerca de 60 g da amostra para eliminação de sedimentos finos (silte e argila);
- c) Nova secagem e pesagem do produto da elutriação para determinação da percentagem de sedimentos finos, através da diferença entre peso inicial e o peso final;
- d) Peneiramento mecânico em "rot-up" por aproximadamente 15 minutos em peneiras com intervalos de 0,5 ϕ , desde a fração 4 ϕ (0,062 mm) até -1,5 ϕ (4 mm);
- e) Amostras que apresentaram mais que 5% de finos após a elutriação tiveram também uma réplica processada por pipetagem. Cerca de 50 g de amostra

livre de matéria orgânica através de queima com H_2O_2 , foi lavada com água destilada em peneira com abertura 0,0062 mm. Aos sedimentos finos que passaram pela peneira junto com a água destilada foi adicionado 5% de defloculante Pirofosfato de Sódio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Esta solução foi para as pipetas de decantação onde o procedimento de pipetagem foi executado conforme procedimento descrito em Carver (1971).

O cálculo dos parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) foi feito pelo Método dos Momentos (Tanner, 1995) através do software Sysgran 2.4 (Camargo, 1999). A classificação verbal de granulometria adotada foi a proposta por Wentworth (1922). Os teores de carbonato de cálcio (CaCO_3) foram determinados através da diferença entre o peso inicial (10 g da amostra original seca), e o peso final após o fim da reação do carbonato de cálcio com o ácido clorídrico (HCl) a 10%. O produto da reação com HCl é lavado com água quente ($\cong 90^\circ \text{C}$) e a amostra é seca em estufa para a pesagem final. Os teores de matéria orgânica foram determinados através da diferença entre o peso inicial (cerca de 80 g da amostra original seca), e o peso final após o fim da queima total da matéria orgânica com a água oxigenada a 30%. O produto da reação é seco em estufa a 60°C para a pesagem final.

5.3. Resultados

5.3.1. Sedimentos de fundo

As amostras de sedimentos de fundo são compostas por 95% de grãos terrígenos sendo a maioria quartzo. Tiveram em média 74% de seu peso representado na fração granulométrica areia fina (média Phi 2,74). Fragmentos de conchas ocorrem em 40% das amostras, normalmente associados às frações areia média, areia grossa e areia muito grossa, representando cerca de 4% em média do peso das amostras em que eles ocorreram, com exceção da amostra G16, onde ocorreu 18% de CaCO_3 . A maioria das amostras possuem teores de finos (silte + argila) abaixo de 5%. Cerca de 28% das amostras apresentaram teores de finos entre 5% e 10% com exceção da amostra G7 que apresentou 30% de seu peso composto por finos. O grau de seleção nas amostras variou de muito bem selecionado até pobremente selecionado. O teor de matéria orgânica nas amostras não ultrapassa 2% (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Resultados do processamento estatístico das amostras do fundo do Saco do Limoeiro. AMG – Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM – Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; M.O. – Matéria orgânica.

Amostra	Média (Phi)	Classificação	Grau de Seleção	% Cascalho	% AMG	% AG	% AM	% AF	% AMF	% Silte	% Argila	% CaCO ₃	% M. O.
G1	2,64	Areia fina	Moderadamente selecionado	5,07	3,50	1,83	4,33	63,57	21,70	0,00	0,00	12,32	1,42
G2	2,74	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,04	0,83	86,18	12,94	0,00	0,00	1,06	1,01
G3	2,87	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,10	0,27	1,53	69,57	28,54	0,00	0,00	1,97	1,15
G4	2,77	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	0,42	83,90	15,68	0,00	0,00	1,00	0,34
G5	2,86	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,13	2,07	71,13	26,67	0,00	0,00	2,36	0,91
G6	2,77	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,04	0,11	0,22	87,40	12,22	0,00	0,00	0,92	0,51
G7	3,71	Areia muito fina	Pobrememente selecionado	0,00	0,00	0,05	1,23	47,80	19,35	26,05	5,51	5,24	5,85
G8	2,55	Areia fina	Bem selecionado	0,00	0,06	0,41	4,37	88,13	7,02	0,00	0,00	1,55	0,73
G9	2,77	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,01	0,08	87,36	12,55	0,00	0,00	2,01	0,68
G10	2,96	Areia fina	Moderadamente selecionado	0,00	0,00	0,04	2,23	57,99	30,22	7,01	2,51	2,70	1,95
G11	2,79	Areia fina	Muito bem selecionado	0,39	0,57	0,50	1,36	79,54	17,64	0,00	0,00	3,87	1,71
G12	2,60	Areia fina	Moderadamente selecionado	10,14	2,86	1,32	1,38	67,37	16,94	0,00	0,00	6,04	2,34
G13	2,81	Areia fina	Bem selecionado	1,47	0,48	0,07	2,32	75,40	20,25	0,00	0,00	5,28	1,96
G14	2,77	Areia fina	Bem selecionado	1,58	0,12	0,10	1,22	77,60	19,38	0,00	0,00	2,77	1,03
G15	2,76	Areia fina	Bem selecionado	0,00	0,00	0,03	1,28	79,56	15,62	1,00	2,51	2,31	1,52
G16	1,30	Areia média	Pobrememente selecionado	34,43	2,03	0,81	2,63	52,38	7,73	0,00	0,00	18,32	2,40
G17	2,83	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,14	0,77	0,32	79,49	15,75	1,01	2,53	2,66	0,77
G18	2,61	Areia fina	Pobrememente selecionado	0,00	0,00	0,00	3,29	79,68	4,42	9,08	3,53	3,94	2,93
G19	2,60	Areia fina	Moderadamente selecionado	0,36	0,47	0,74	5,43	79,77	6,43	5,22	1,57	4,54	1,96
G20	3,25	Areia muito fina	Pobrememente selecionado	0,00	0,00	0,20	0,49	30,26	56,39	9,12	3,55	3,56	2,73
G21	2,77	Areia fina	Moderadamente selecionado	0,00	0,00	0,30	1,51	81,20	9,23	4,14	3,62	2,86	1,56
G22	2,76	Areia fina	Pobrememente selecionado	1,52	0,73	0,73	2,26	72,94	11,79	7,39	2,64	3,75	1,75
G23	2,68	Areia fina	Bem selecionado	0,00	0,00	0,00	0,32	87,92	7,07	2,08	2,61	3,34	1,17
G24/cava	2,67	Areia fina	Moderadamente selecionado	0,00	0,00	0,34	2,63	80,80	10,38	3,20	2,67	3,66	1,37
G24/crista	2,78	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	0,21	86,74	10,45	1,04	1,56	2,36	0,98
média	2,74	Areia fina	Pobrememente a muito bem selecionado	2,20	0,44	0,35	1,76	74,15	16,66	3,05	1,39	4,02	1,63

A distribuição da média granulométrica dos sedimentos de fundo no Saco do Limoeiro apresenta uma ampla predominância de areia fina. Na porção mais abrigada, a leste da área de amostragem, a média granulométrica tende a ser areia muito fina (Figura 5.8).

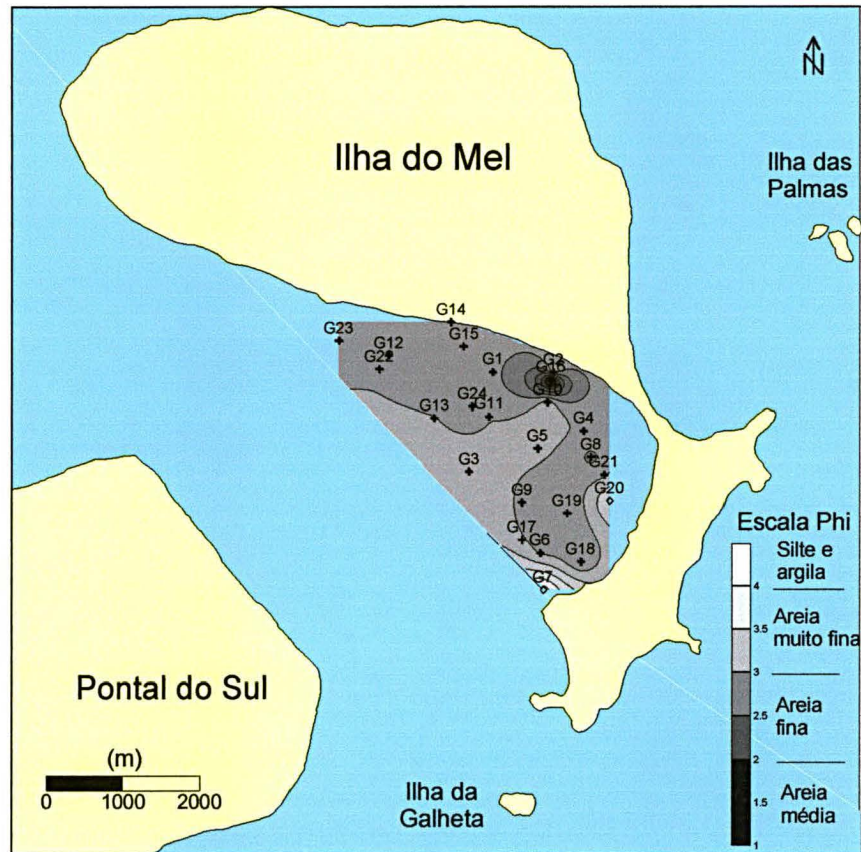


Figura 5.8: Distribuição da média granulométrica dos sedimentos de fundo do Saco do Limoeiro.

5.3.2. Formas de fundo

O levantamento feito com o ecobatímetro portátil sobre a rampa de enchente mostrou que o substrato sofre uma suave ondulação, acusada por uma variação de cerca de 20 cm nos valores registrados pelo ecobatímetro. Estas variações completavam um ciclo quando a embarcação percorria uma distância estimada entre 20 m e 30 m. Essa suave ondulação foi atribuída a presença de uma forma de fundo com comprimento de onda (λ) entre 20 m e 30 m, e altura (h) de aproximadamente 20 cm.

Através de observação direta por mergulho livre, seguindo a direção percorrida pela embarcação com ecobatímetro, pode-se notar diferentes características no fundo entre as porções mais rasas (cristas) e as mais profundas (cavas) da forma de fundo, com uma transição bastante difusa entre elas. Nas

cristas ocorriam marcas onduladas simétricas (*ripples*), com comprimento de onda entre 8 cm e 12 cm, e alturas entre 1,5 cm e 4 cm. As análises granulométricas indicaram que nestas cristas a média granulométrica é de areia fina. Silte e argila compõe 2,5% do peso da amostra. O teor de CaCO_3 é de 2% e o de matéria orgânica 1% (amostra G24/crista na tabela 5.1). As cavas têm um aspecto lamoso e sem marcas onduladas, com conchas de moluscos bivalves inteiras e fragmentadas, muco algálico e locas de crustáceos evidenciando uma grande atividade bentônica. Análises granulométricas indicam que os sedimentos das cavas têm areia fina como fração granulométrica média. Silte e argila compõe 5,8% do peso da amostra. O teor de CaCO_3 é de 3,7% e o de matéria orgânica 1,4% (amostra G24/cava na tabela 5.1).

Variações na amplitude de formas de fundo puderam ser identificadas também através de perfis batimétricos construídos a partir da folha de bordo do levantamento batimétrico utilizado na sobreposição com o mosaico de fotos aéreas (Figura 5.9).

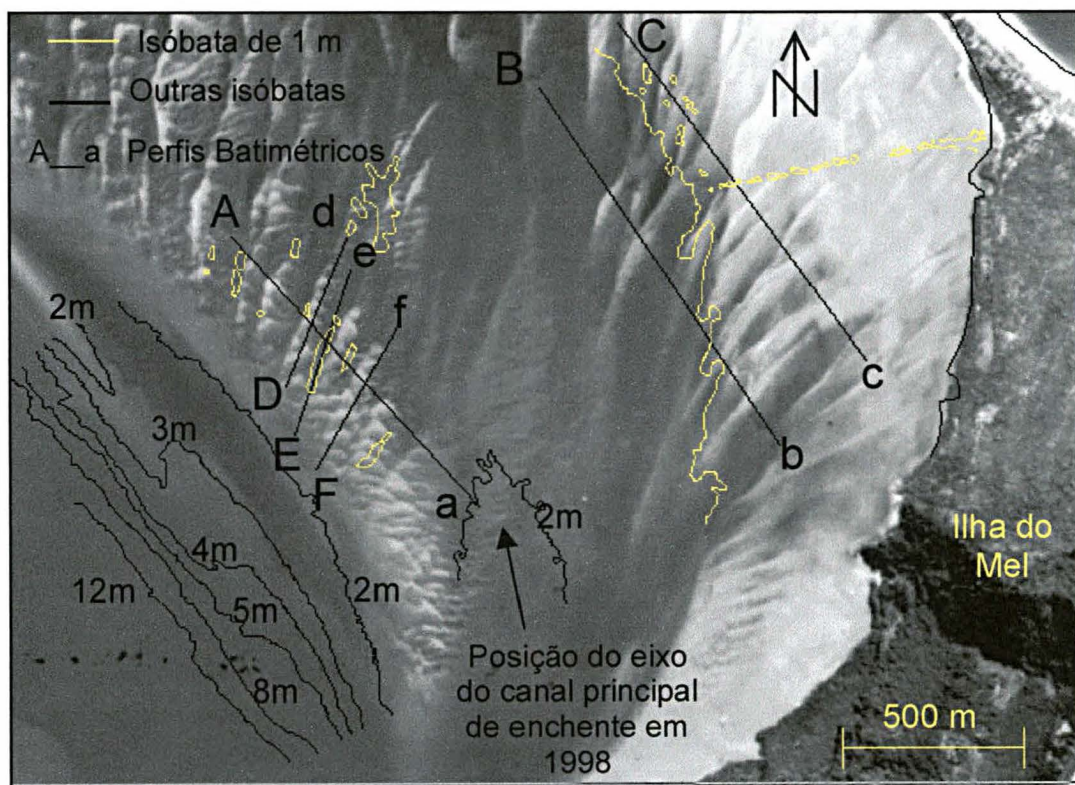


Figura 5.9: Mapa de isóbatas de 1998 sobreposto ao mosaico de fotos aéreas de 1980 mostrando: o posicionamento dos perfis batimétricos; e os deslocamentos de formas de fundo e da posição do eixo do canal principal de enchente em 1998.

Nos perfis orientados (sentido NW-SE) transversalmente às formas de fundo de maior porte, observadas no mosaico de fotos aéreas, podem ser identificados dois grupos de formas de fundo com base na amplitude da variação de profundidade. Um grupo com amplitudes na ordem de 40 a 50 cm, denominado Feições A; e outro grupo superposto, denominado Feições B, com amplitudes menores que 25 cm (Figura 5.10).

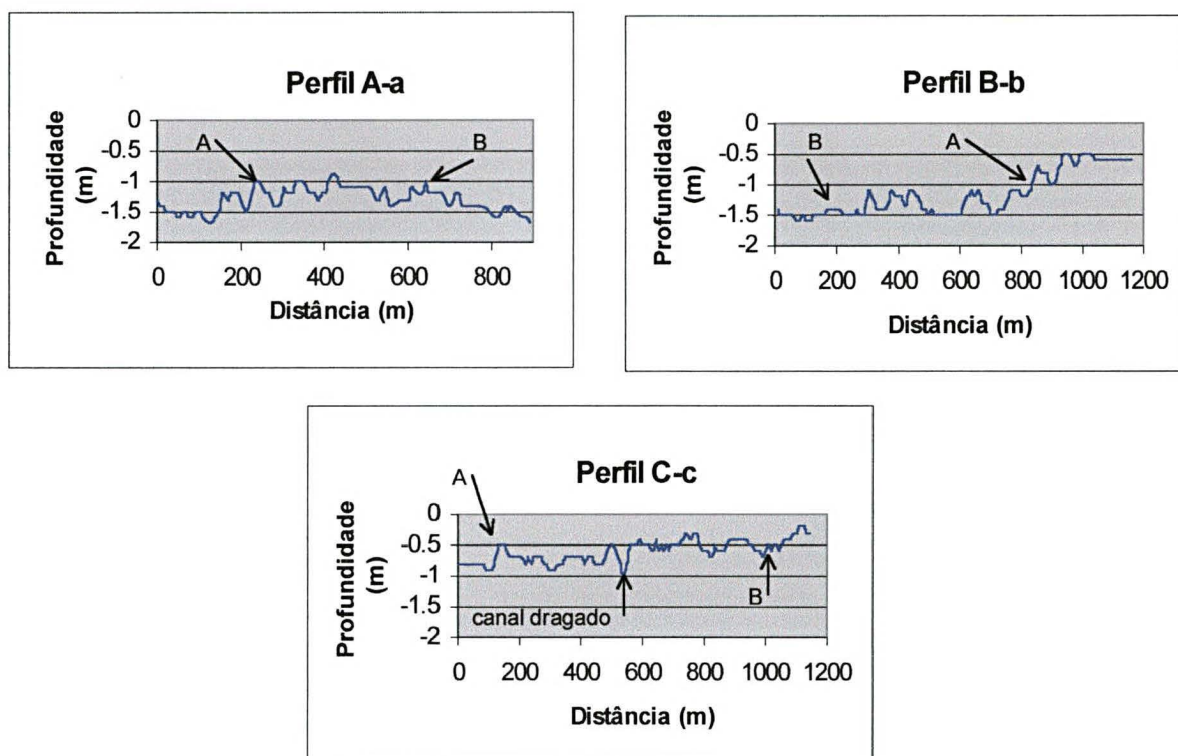


Figura 5.10: Perfis batimétricos orientados transversalmente às feições de fundo de maior porte, com direção NW-SE, mostrando as variações na amplitude das Feições A e B. Ver localização dos perfis na figura 5.9.

Outros três perfis estão orientados (sentido SW-NE) longitudinalmente às feições de fundo de maior porte e transversalmente à feições de fundo com menor porte. Pode-se identificar uma grande feição com amplitude de até 80 cm, delineada em toda a extensão do perfil (Feições A), e um conjunto de feições de fundo de menor porte sobrepostas, com amplitudes menores que 25 cm (Feições B) (Figura 5.11).

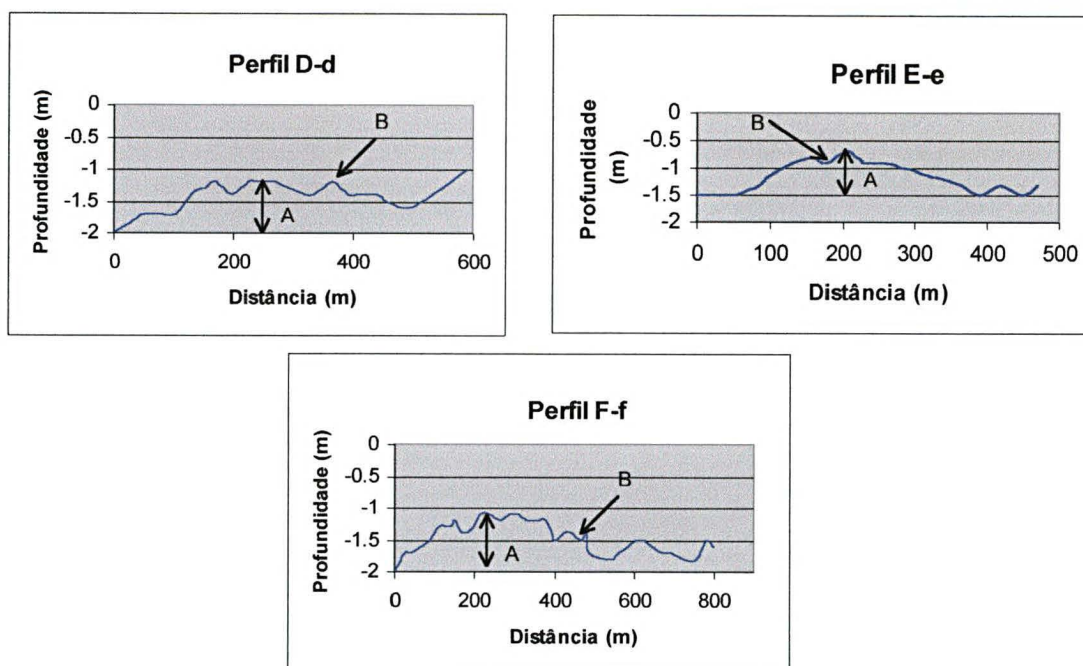


Figura 5.11: Perfis batimétricos orientados longitudinalmente às feições de fundo de maior porte e transversalmente às feições de fundo com menor porte, com direção SW-NE, mostrando a amplitude de uma feição de fundo de grande porte (Feições A), e as variações de amplitude das Feições B. Ver localização dos perfis na figura 5.9.

5.3.3. Mudanças na configuração do fundo entre 1980 e 1998

No mosaico de fotos aéreas de 1980, áreas muito rasas aparecem em tonalidades claras enquanto que áreas mais profundas possuem tonalidades mais escuras. A sobreposição do mapa de isóbatas do levantamento batimétrico feito em 1998 sobre o mosaico de fotos aéreas, permitiu observar algumas mudanças ocorridas nas feições do fundo do Saco do Limoeiro num período de 18 anos. Essa comparação mostra que não há uma coincidência entre as feições rasas e as isóbatas de 1 m (Figura 5.9).

Foram identificados deslocamentos médios de 23 m no lado direito do canal principal de enchente. Sobre a rampa de enchente os deslocamentos são da ordem de 55 m em média. A posição do canal principal de enchente em 1998 está delineada pela isóbata de 2 m. A presença de feições rasas (áreas claras no mosaico) dentro do canal principal de enchente, pode indicar que ele migrou por sobre onde antes existiam feições mais rasas que 2 m. Esse deslocamento é de aproximadamente 150 m na direção noroeste (Figura 5.9).

5.4. Discussão

Os sedimentos do fundo do Saco do Limoeiro são compostos em geral por 95% de grãos terrígenos, estando 74% deles representados na fração areia fina. Fragmentos de conchas (4%) e matéria orgânica (1%) somam o restante da composição média destes sedimentos. As frações granulométricas silte e argila compõem 5% do peso da maioria das amostras porém, 28% delas possuem teores entre 5% e 10% podendo atingir até 30%. Isto resulta numa grande variação no grau de seleção das amostras.

Um aumento de aproximadamente 40% nos teores de finos, carbonato de cálcio e matéria orgânica foi observado na amostra obtida na cava, em relação a amostra obtida na crista da forma de fundo observada por mergulho. Apesar de apenas duas amostras terem sido utilizadas nessa comparação, o fato de 28% das amostras na área do Saco do Limoeiro possuírem até 10% de sedimentos finos pode ser devido ao posicionamento de pontos de amostragem sobre cavas de formas de fundo maiores que marcas onduladas.

Segundo Allen (1980), sedimentos argilosos freqüentemente estão associados às cavas de ondas de areia. Conforme o mapa de distribuição das médias granulométricas, um aumento no teor de sedimentos finos também está relacionado à proximidade da área abrigada, na porção leste do Saco do Limoeiro.

Complementando as interpretações de Angulo (1999) com os resultados obtidos no presente trabalho, pelo menos quatro tipos de formas de fundo ocorrem, podendo ser separadas em três classes:

a) ondas de areia (*sand waves*): Formas de fundo de primeira ordem de grandeza que possuem cristas orientadas entre NNE e NNW e comprimento de onda entre 50 e 200 m, apresentam alturas entre 50 e 80 cm como pode ser observado tanto nos perfis batimétricos orientados transversalmente às ondas de areia (Figura 5.10), quanto nos orientados longitudinalmente a elas (Figura 5.11), sendo as ondas de areia relacionadas as Feições A.

b) mega-ondulações (*mega-ripples*): Formas de fundo que podem possuir duas ordens de grandeza. As mega-ondulações de segunda ordem, possuem cristas orientadas entre E e NE e comprimento de onda entre 10 e 50 m. As mega-ondulações de terceira ordem possuem cristas orientadas entre SSW-NNE e SW-NE e comprimento de onda de cerca de 10 m. Ambas as categorias possuem alturas menores que 25 cm sendo relacionadas às Feições B.

c) marcas onduladas simétricas (*ripples*): Feições de fundo menores com comprimento de onda entre 8 cm e 12 cm, e alturas entre 1,5 cm e 4 cm, e com direções que variam rapidamente de acordo com mudanças nos ciclos de marés e as características das frentes de ondas que entram no estuário.

Há limitações no método para determinação de mudanças na configuração do fundo através da sobreposição do mosaico de fotografias aéreas com o levantamento batimétrico. Imprecisões nas medidas de deslocamentos de feições de fundo podem ocorrer devido a deformações implícitas no método de georreferenciamento do mosaico. Outra limitação se deve-se ao fato de não se poder utilizar uma única forma de fundo como referência para se determinar a distância por ela percorrida. Apesar dessas limitações, pode-se considerar que os valores medidos representam deslocamentos mínimos.

Desse modo pode-se considerar que num intervalo de 18 anos, as formas de fundo na área à esquerda do canal principal de enchente sobre a rampa de enchente, apresentaram em média um deslocamento mínimo na ordem de 3 m/ano; e na área à direita do canal principal de enchente, junto à porção abrigada na parte leste do Saco do Limoeiro, as formas de fundo apresentaram em média, um deslocamento mínimo na ordem de 1,3 m/ano. Pode-se também considerar que o eixo do canal principal de enchente parece ter migrado cerca de 8,3 m/ano na direção da rampa de enchente (NW).

Pescadores responsáveis pelo deslocamento de uma baliza posicionada na crista de uma onda de areia, marcando a margem de um canal de navegação por eles utilizado, relataram deslocamentos na ordem de 5 a 6 m/ano em direção ao interior do estuário. Relataram também, que em anos com grande frequência de ventos provenientes de sul, as ondas de areia pareciam deslocarem-se mais que em outros anos.

A migração das ondas de areia para o interior do estuário relatada por pescadores, e as feições identificadas nos perfis do levantamento batimétrico, reforçam a interpretação de Angulo (1999) de que o Saco do Limoeiro possui feições de fundo que permitem caracterizá-lo como sendo um hemi-delta de maré enchente.

6. CORRENTES DE MARÉ E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Transporte de sedimentos por correntes trativas junto ao fundo é um processo sedimentar importante em áreas próximas a desembocaduras devido a sua capacidade de modificação da topografia de fundo mobilizando grandes quantidades de sedimentos. Este processo é produto de uma complexa interação de fatores que envolvem inúmeras variáveis. Dentre elas destacam-se a velocidade e estratificação do fluxo, a rugosidade do fundo, granulometria, forma e densidade do sedimento, variação significativa da profundidade no ciclo de maré e interação entre ondas e correntes. Apesar da dificuldade de isolamento destas variáveis, alguns trabalhos sobre transporte por fluxo trativo de sedimentos não-coesivos têm obtido resultados satisfatórios. Uma revisão sobre esse tema pode ser encontrada em Ludwick (1989).

Um dos conceitos mais importantes para o estudo do transporte de sedimentos é o limiar da movimentação dos grãos (*threshold of sediment motion*), que expressa, para determinadas características e condições do fluido e sedimento, a situação em que os sedimentos estarão prestes a iniciarem uma movimentação. Miller *et al.* (1977) fornecem uma rigorosa seleção de dados obtidos em ensaios de laboratório sob condições controladas, e fazem uma avaliação dos trabalhos que abordam o limiar da movimentação de grãos. Concluíram que o trabalho de Yalin (1972) apresenta a maneira mais eficaz para calcular o limiar de movimentação de sedimentos, computando-se apenas parâmetros e variáveis de simples obtenção em campo.

6.1. Método

O comportamento de correntes de maré e sua capacidade de transportar sedimentos na rampa de enchente e no canal principal de enchente do Saco do Limoeiro (localização na Figura 5.2), foram determinados para condições oceanográficas normais (mar calmo), durante um ciclo de maré de sizígia, quando as correntes são mais intensas.

Uma série temporal da variação de profundidade, do sentido e velocidade de correntes de maré durante um ciclo de maré de sizígia, foi obtida com correntômetros modelo S4 da InterOcean Systems Inc., fundeados a cerca de 50 cm do fundo. A medição no canal principal de enchente foi feita em 03/05/99 e sobre a rampa de enchente em 26/10/99.

A capacidade de correntes de maré transportarem sedimentos por tração foi calculada da seguinte maneira:

Yalin (1972) apresenta uma relação entre dois parâmetros cujos valores plotados em um gráfico, permitem determinar qual velocidade de fluxo é necessária para iniciar o movimento de sedimentos não-coesivos (Figura 6.1).

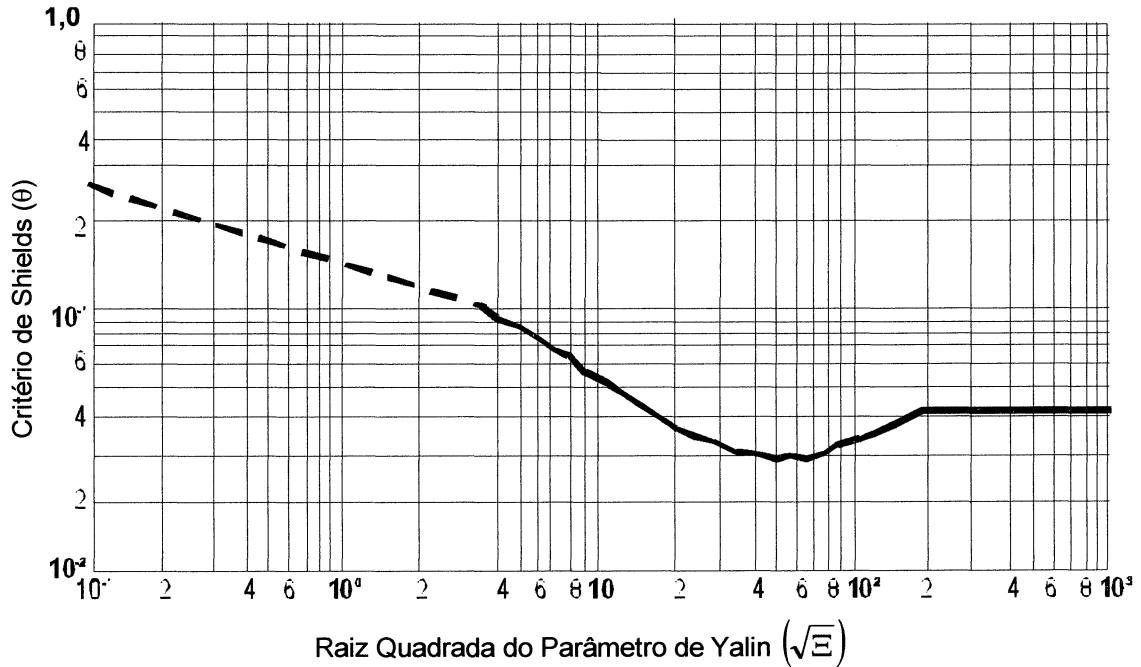


Figura 6.1: Gráfico proposto por Yalin (1972) onde a curva em linha sólida representa o limiar de movimentação de grão, sendo que a área acima dessa linha representa uma condição teórica de movimentação de grãos e a área abaixo representa uma condição teórica sem movimentação de grãos (modificado de Miller *et al.* 1977).

Conforme o gráfico proposto por Yalin (1972) no eixo das abcissas consta a raiz quadrada do Parâmetro de Yalin (Ξ) expresso por,

$$\Xi = \frac{(\rho_s - \rho)gD^3}{\rho\nu^2} \quad (1)$$

onde ρ_s é a densidade do sedimento em g/cm^3 , ρ é a densidade do fluido em g/cm^3 , ν é a viscosidade cinemática do fluido em cm^2/s , g é a aceleração da gravidade em cm/s^2 , e D é o diâmetro médio do sedimento em cm .

No eixo das ordenadas consta o valor do limiar de movimentação segundo o Critério de Shields (θ) expresso por,

$$\theta = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (2)$$

onde ρ_s é a densidade do sedimento em g/cm³, ρ é a densidade do fluido em g/cm³, g é a aceleração da gravidade em cm/s², e D é o diâmetro médio do sedimento em cm e u_* é a velocidade de cisalhamento (*shear velocity* ou *friction velocity*) em cm/s.

A velocidade de cisalhamento é a velocidade junto aos grãos (distância tendendo a zero) calculada através da equação logarítmica de Karman – Prandtl,

$$u_{(z)} = (u_* / k) \ln(Z / Z_0) \quad (3)$$

onde u_z é a velocidade da corrente em cm/s a uma profundidade Z dada em cm, k é a constante de Von Karmam ($k=0,4$), Z_0 é um fator adimensional de rugosidade do fundo (Yang, 1986).

A rugosidade do fundo é função do comprimento (λ) e altura (h) das formas de fundo. Pode ser obtida através da equação,

$$Z_0 = h^2 / 2\lambda \quad (4)$$

formulada por Lettau (1969) pois, apesar dela ter sido elaborada para ambientes eólicos, autores como Black & Healey (1986) e Ke *et al.* (1994) a utilizaram com resultados satisfatórios em condições semelhantes às encontradas no Saco do Limoeiro.

6.2. Resultados

Considerando a densidade de grãos de quartzo (ρ_s) como sendo 2,65 g/cm³; a densidade da água (ρ) sendo 1 g/cm³; a viscosidade cinemática da água (ν) 0,01 cm²/s; a aceleração da gravidade (g) 980 cm/s² e o diâmetro médio dos grãos (D) 0,016 cm; obtém-se um valor de 8,14 para o Parâmetro de Yalin (Ξ), aplicando-se a equação (1).

A plotagem desse valor no gráfico de limiar de movimentação dos grãos (Figura 6.1) indica que o limiar de movimentação ocorre para um valor de 0,055 do

Critério de Shields (θ). Computando-se este resultado na equação (2) obtém-se um valor de 1,19 cm/s para a velocidade de cisalhamento (u_*).

Para relacionar a velocidade de cisalhamento obtida, aos valores de velocidade de corrente medidos pelos correntômetros a 50 cm do fundo, computou-se o comprimento (λ) e altura (h) das formas de fundo (*ripples* com 10,7 cm e 2,3 cm respectivamente) na equação (4), resultando num valor de 0,25 para Z_0 . O valor da rugosidade do fundo (Z_0) por sua vez, foi aplicado na equação (3), resultando num valor de 15,8 cm/s para uma velocidade de corrente (u_{50}) medida a 50 cm do fundo. Isso significa que os sedimentos iniciam sua movimentação quando as velocidades de correntes atingem o valor de 15,8 cm/s medido a 50 cm do fundo.

Relacionando o valor de velocidade de correntes obtido para o limiar de movimentação dos grãos às séries temporais das duas estações de medição, foram identificadas as seguintes características hidrodinâmicas para o canal principal de enchente e rampa de enchente.

Canal principal de enchente

No canal principal de enchente as velocidades máximas de correntes medidas ocorreram nos períodos de vazante com 27,8 cm/s. As velocidades médias foram de 20,4 cm/s nos períodos de vazante e 17,1 cm/s nos períodos de enchente (Tabela 6.1).

Tabela 6.1: Velocidades de correntes de marés no canal principal de enchente em períodos de vazante e enchente durante um ciclo de maré de sizígia.

Situação de maré	Velocidades mínimas (cm/s)	Velocidades médias (cm/s)	Velocidades Máximas (cm/s)	Desvio padrão (cm/s)
Enchente	5,1	17,1	25,1	6,5
Vazante	5,1	20,4	27,8	6,0

As correntes de maré capazes de transportar sedimentos por tração ($u_{50} > 15,8$ cm/s) ocorreram em todo o período de vazante e no início do período de enchente (Figura 6.2)

Os sentidos de correntes de maré no canal principal de enchente tiveram um comportamento bem definido sendo que nos períodos de vazante o fluxo é orientado

para o quadrante S-SE e nos períodos de enchente para o quadrante W-NW (Figura 6.3).

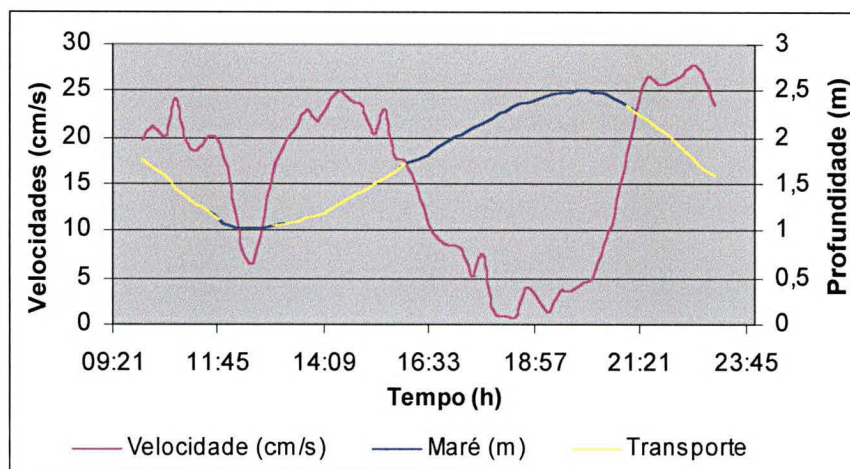


Figura 6.2: Gráfico mostrando a variação da maré, a variação das velocidades de correntes de maré e os momentos em que há transporte de sedimentos no canal principal de enchente do Saco do Limoeiro, durante um ciclo de maré de sizígia.

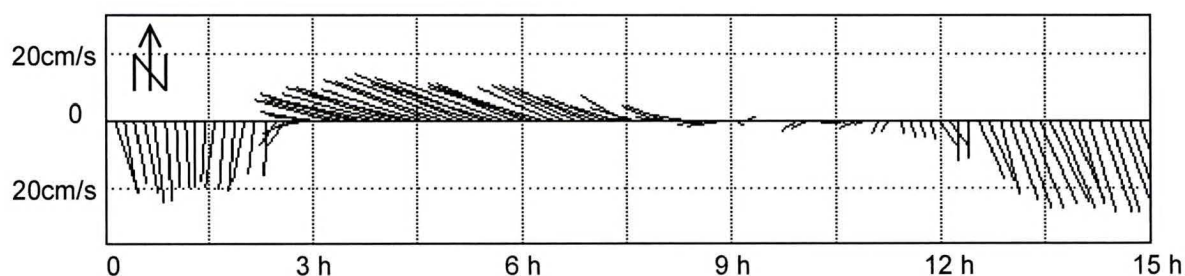


Figura 6.3: Gráfico com a variação de sentido e intensidade de correntes de maré durante um ciclo de maré de sizígia no canal principal de enchente.

Rampa de enchente

As correntes de maré na rampa de enchente atingiram velocidades máximas nos períodos de vazante com 43,8 cm/s. A velocidade média no período de vazante foi de 24,2 cm/s e no período de enchente 12,5 cm/s (tabela 2).

Tabela 6.2: Velocidades de correntes de marés na rampa de enchente de enchente em períodos de vazante e enchente durante um ciclo de maré de sizígia.

Situação de maré	Velocidades mínimas (cm/s)	Velocidades médias (cm/s)	Velocidades máximas (cm/s)	Desvio padrão (cm/s)
Enchente	1,2	12,5	20,8	5,3
Vazante	2,2	24,2	43,8	13,8

As correntes de maré capazes de transportar sedimentos na rampa de enchente ocorrem nos períodos de vazante e em apenas alguns momentos durante os períodos de enchente (Figura 6.4).

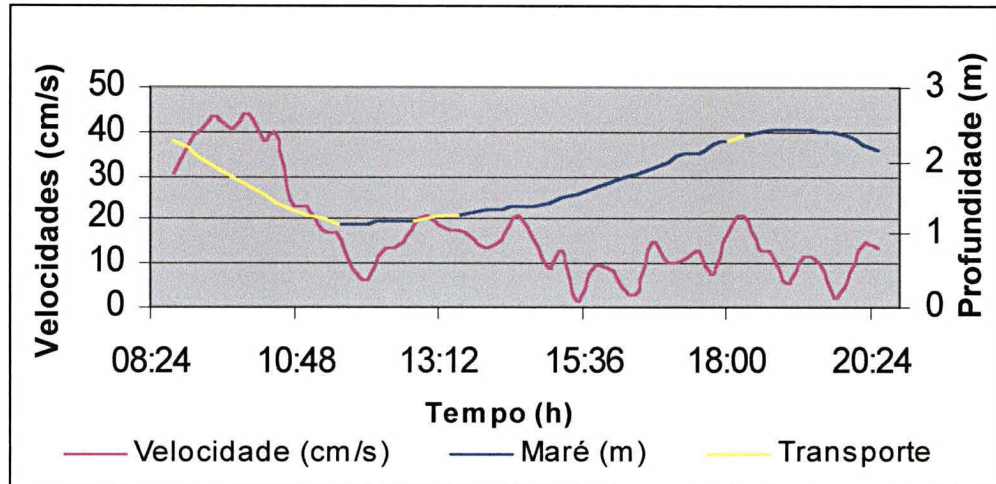


Figura 6.4: Gráfico mostrando a variação da maré, a variação das velocidades de correntes de maré e os momentos em que há transporte de sedimentos na rampa de enchente do Saco do Limoeiro, durante um ciclo de maré de sizígia.

Os sentidos de correntes de maré na rampa de enchente apresentaram uma tendência para S-SE nos períodos de vazante e para N-NW nos períodos de enchente (Figura 6.5).

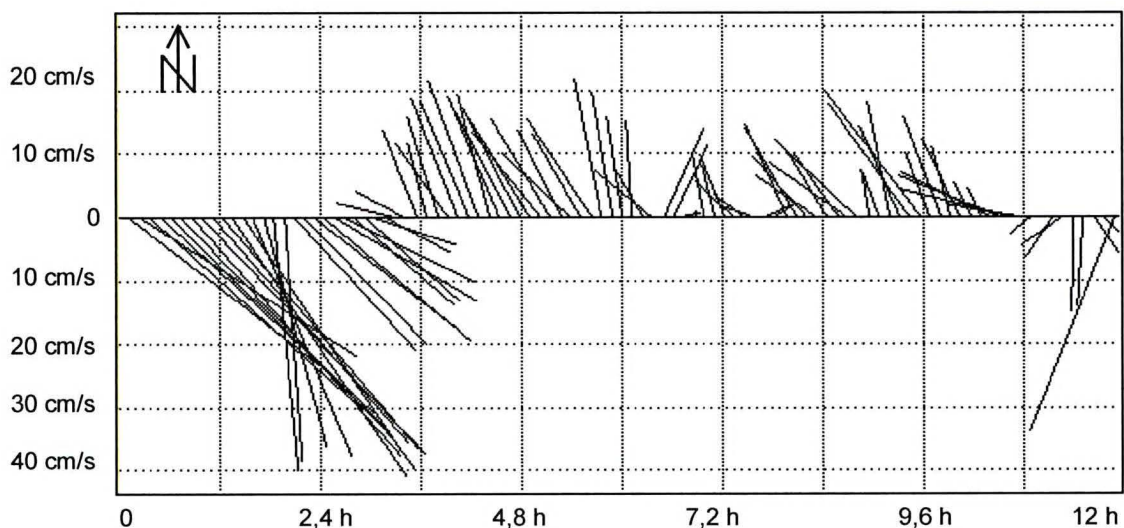


Figura 6.5: Gráfico com a variação de sentido e intensidade de correntes de maré durante um ciclo de maré de sizígia na rampa de enchente.

A representação gráfica do vetor progressivo das correntes de maré aferidas pelos correntômetros durante o período de medição, mostra que o sentido resultante do deslocamento de uma partícula teórica em suspensão é orientada segundo sentidos de vazante. No canal principal de enchente a resultante do deslocamento foi de 3.150 m, e na rampa de enchente a resultante do deslocamento foi de 765 m (Figura 6.6).



Figura 6.6: Percurso teórico de uma partícula em suspensão, durante um ciclo de maré completo no canal principal de enchente e na rampa de enchente. A escala dos vetores é três vezes menor para se ajustar à figura.

6.3. Discussão

As características do fundo do Saco do Limoeiro impõem algumas das diversas limitações do método de determinação da capacidade das correntes de transportar sedimentos. A precisão dos cálculos pode ser comprometida pela presença de formas de fundo com diferentes ordens de grandeza (dão efeito somatório à rugosidade do fundo) e a ocorrência de sedimentos coesivos nas cavas de mega-ondulações que ocorrem sobre a rampa de enchente. No entanto, o suave perfil das mega-ondulações e o bom grau de seleção dos sedimentos em suas cristas permite atribuir aos resultados dos cálculo, uma satisfatória aproximação considerando apenas as *ripples* que ocorrem nas cristas das mega-ondulações como rugosidade do fundo. Sendo assim, o cálculo da capacidade de transporte de sedimentos pelas correntes de maré fica limitado as cristas das formas de fundo de maior magnitude e nos demais locais onde não ocorram sedimentos coesivos.

O mesmo problema é menos significativo no canal principal de enchente pois, apesar dele não ter sido observado por mergulho, sabe-se que em fundos de canais

não é comum a presença de sedimentos coesivos, sendo a presença de outras formas de fundo com perfil acentuado além de *ripples*, uma das possíveis fontes de imprecisão.

A dinâmica das correntes de maré e o cálculo do limiar de movimentação dos grãos, feito no canal principal de enchente e na rampa de enchente do Saco do Limoeiro, indicaram que o transporte de sedimentos por tração nestes locais é feito a maior parte do tempo por correntes de vazante que fluem em geral no sentido S-SE. As correntes de enchente, apesar de menos intensas também podem transportar sedimentos no sentido NW em alguns momentos, principalmente no canal principal de enchente. Dessa forma deduz-se que a dinâmica de sedimentos transportados por tração na rampa de enchente e no canal principal de enchente, durante ciclos de maré de sizígia em condições de mar calmo, apresenta um balanço negativo, tendendo a exportar sedimentos pelo canal principal de enchente para as imediações do setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá.

7. ESTRATIGRAFIA E EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA

7.1. Estruturas sedimentares da barreira holocênica

Um dos primeiros trabalhos de descrição de estruturas sedimentares na planície costeira foi feito por Bigarella (1965). Trabalhos publicados sobre esse tema desde então, estão relacionados numa ampla revisão bibliográfica elaborada por Angulo (1992).

Mais recentemente trabalhos como Araújo & Lessa (1996); Araújo *et al.* (1997); Angulo *et al.* (1999) e Lessa *et al.* (2000), descreveram estruturas sedimentares e interpretam fácies na barreira holocênica da planície costeira paranaense, com base em descrições de afloramentos e sondagens nas margens de rios, canais de maré e cavas para extração de areia. De uma maneira geral, as fácies sedimentares da porção holocênica da planície costeira têm sido caracterizadas pelas seguintes estruturas sedimentares (Figuras 7.1 e 7.2):

a) Face praial (*beach face*): Camadas com estratificações plano-paralelas sub-horizontais e/ou horizontais, compostas por areia fina bem selecionada, podendo ocorrer tubos fósseis e lâminas com concentração de minerais pesados.

b) Face litorânea superior à inferior (*upper to lower shore face*): Estratos geralmente horizontais, ocasionalmente associados à argila, detritos vegetais e bioturbações não figurativas. Também podem ocorrer estratificações cruzadas acanaladas, planares e sigmóides em *sets* de 5 cm a 1 m, com areia fina à grossa moderadamente selecionada, contendo detritos vegetais, conchas e fragmentos de conchas. Estratificações cruzadas de pequeno porte truncadas por ondas também foram interpretadas como sendo pertencentes às porções mais profundas deste ambiente.

c) Canal estuarino (*estuary channel*): Alternância de estratos finos a muito finos, de areia fina à muito grossa, mal selecionada, contendo ocasionalmente bolas de lama, detritos vegetais, moldes de conchas e fragmentos de conchas associados. Estratificações cruzadas de pequeno porte também podem estar associadas.

d) Depósitos de sobre-lavagem (*overwash*): Estratos mergulhando até 10° em direção ao continente, compostos por areia fina a média bem selecionada.

e) Planície de maré (*tidal flat*): Representada por camadas muito bioturbadas e com laminações de areia fina e lama. Ocorrem porções muito lamosas com lentes de areia média.

f) Delta de maré enchente (*flood-tidal delta*): Formada por camadas de até 1,5 m de estratificações cruzadas planares que mergulham para NW, com até 30° de inclinação e compostas por areia fina, média e grossa, com presença freqüente de lama e detritos orgânicos.

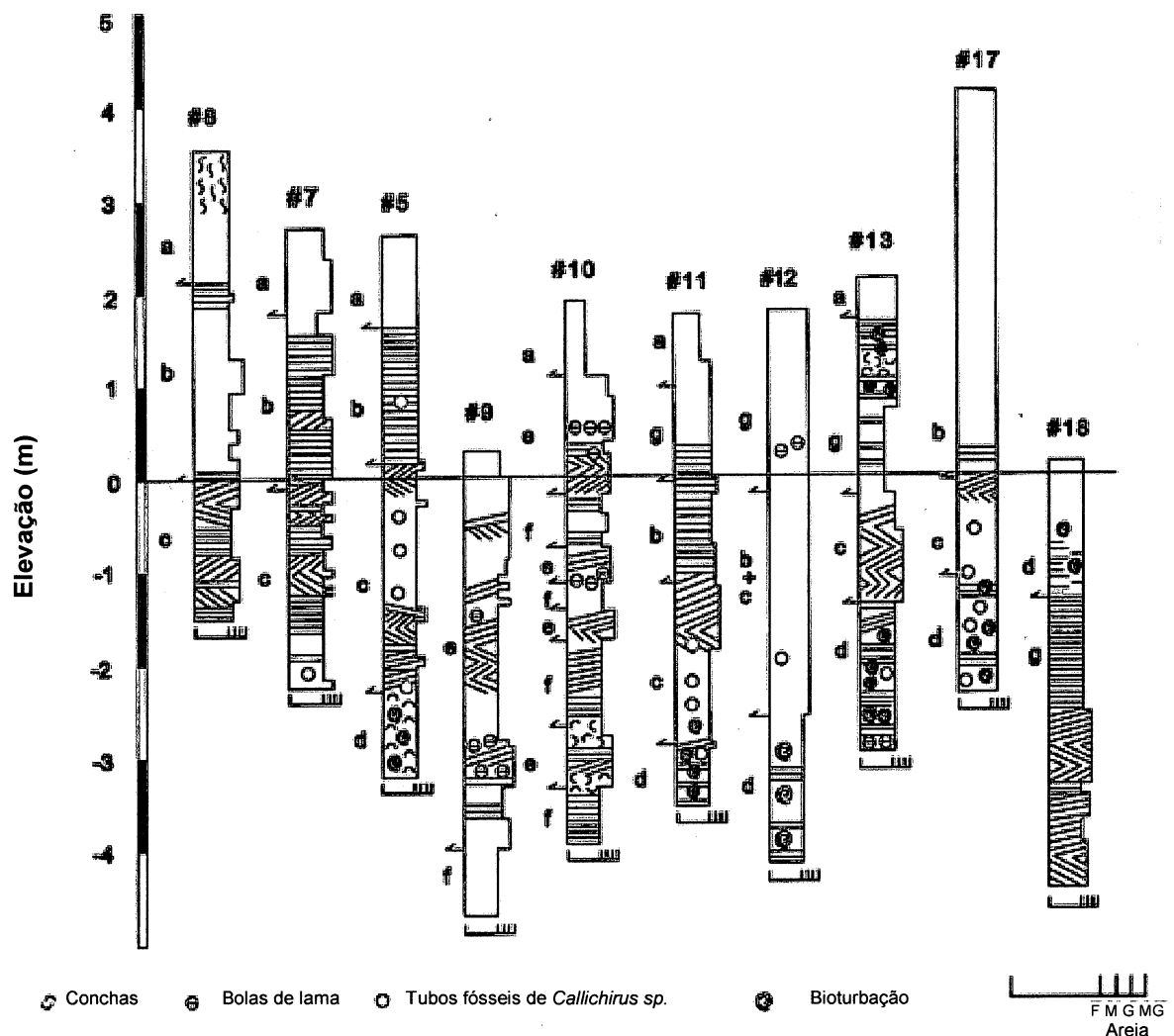


Figura 7.1: Variação granulométrica, estruturas sedimentares e fácies interpretadas (entre as setas à esquerda das colunas) nos testemunhos de sondagem (ver localização na figura 4.5). a) indiferenciado; b) face de praia; c) “*nearshore*”; d) face litorânea superior; e) canal estuarino; f) depósito de sobre-lavagem; g) planície de maré; h) delta de maré enchente (legenda aplicada também à figura 7.2). As estruturas sedimentares são sempre plano-paralelas, horizontais ou inclinadas (modificado de Lessa *et al.* 2000).

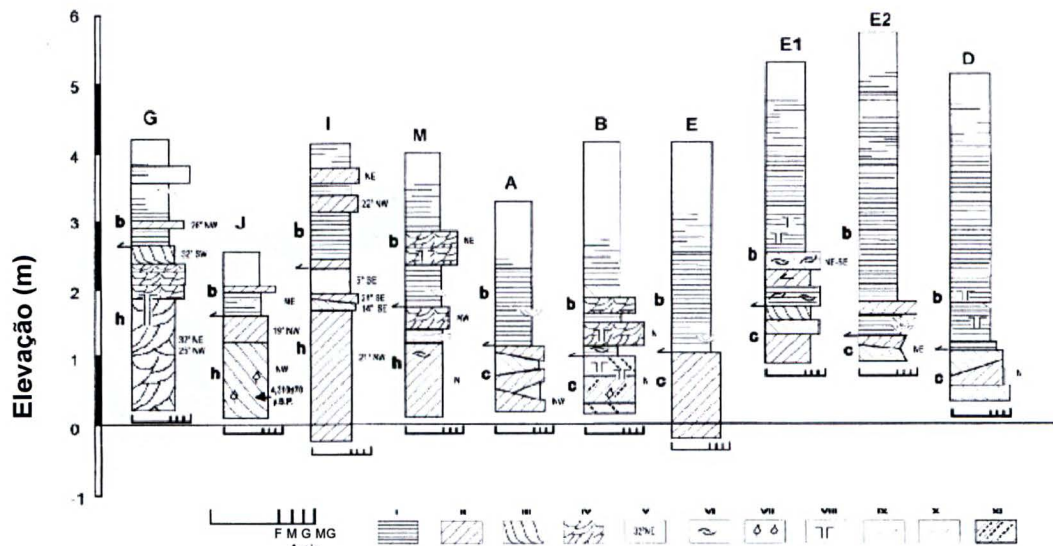


Figura 7.2: Variação granulométrica, estruturas sedimentares e fácies interpretadas (entre as setas à esquerda das colunas) nos afloramentos (ver localização na figura 4.5). Legenda para fácies sedimentares na figura 7.1. I) Estratificação plano-paralela; II) Estratificação cruzada planar; III) Estratificação cruzada tangencial na base; IV) Estratificação cruzada acanalada; V) Direção e ângulo de mergulho; VI) Conchas; VII) Detritos orgânicos; VIII) Tubos fósseis de *Callichirus* sp.; IX) Lentes de sedimentos grossos; X) Pequeno preenchimento de canal; XI) Laminações de lama nos *foresets* (modificado de Lessa *et al.* 2000).

7.2. Materiais e métodos

7.2.1. Sondagens por vibro-testemunhador e descrição de afloramentos

Foram executadas oito sondagens com vibro-testemunhador (*vibro-corer*) e cinco afloramentos foram descritos na Ilha do Mel.

Para a caracterização do sistema deposicional referente ao Saco do Limoeiro quatro sondagens foram posicionadas na crista de formas de fundo, que afloram durante marés baixas de sizígia, (S1, S2, S3 e S4).

Para caracterizar a estratigrafia da porção superior da barreira holocênica onde está inserido o sistema deposicional do Saco do Limoeiro, foram descritos cinco afloramentos distribuídos entre a Ponta Oeste e a Praia da Brasília na Ilha do Mel (A1, A2, A3, A4, A5). Outras três sondagens (S5, S6 e S7) foram posicionadas na base de três (A1, A3 e A5), dos cinco afloramentos. A localização das sondagens e afloramentos pode ser observadas na figura 7.3.

Para a verificação da continuidade das unidades sedimentares descritas na porção superior da barreira holocênica na Ilha do Mel, uma última sondagem (S8) foi feita sobre uma planície arenosa que surgiu por efeito do deslocamento da linha de costa ao lado do canal da DNOS em Pontal do Sul (Figura 7.4).

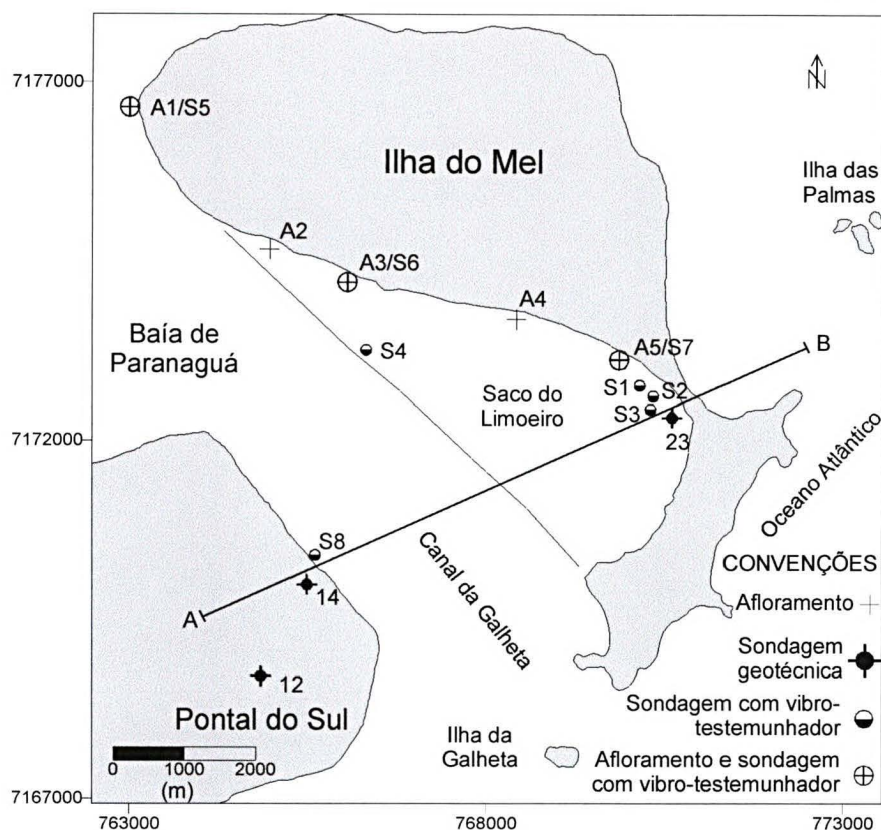


Figura 7.3: Localização de sondagens geotécnicas, das sondagens com vibro-testemunhador, dos afloramentos descritos e do perfil transversal.

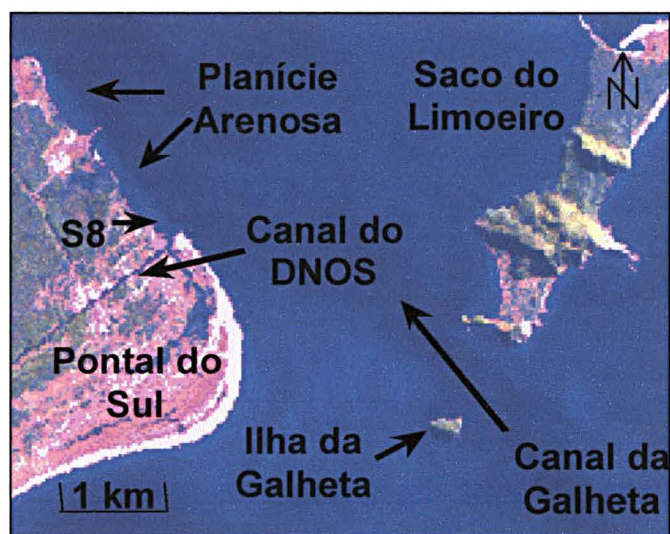


Figura 7.4: Detalhe de imagem de satélite (Landsat 5 de 18/07/99) ilustrando a planície arenosa ao lado do canal da DNOS em Ponta do Sul, e a posição da sondagem S8.

Sondagem por vibro-testemunhador consiste em, através de vibração, fazer penetrar em sedimentos inconsolidados um tubo de alumínio, e recuperá-lo com os estratos preservados em seu interior. Um motor estacionário de 3 hp à gasolina aciona um vibrador de imersão, que é vinculado ao tubo de sondagem por uma abraçadeira especialmente adaptada (Figura 7.5a). Depois da penetração, o tubo é

então tampado e recuperado através de uma talha manual fixada a um tripé (Figura 7.5b).

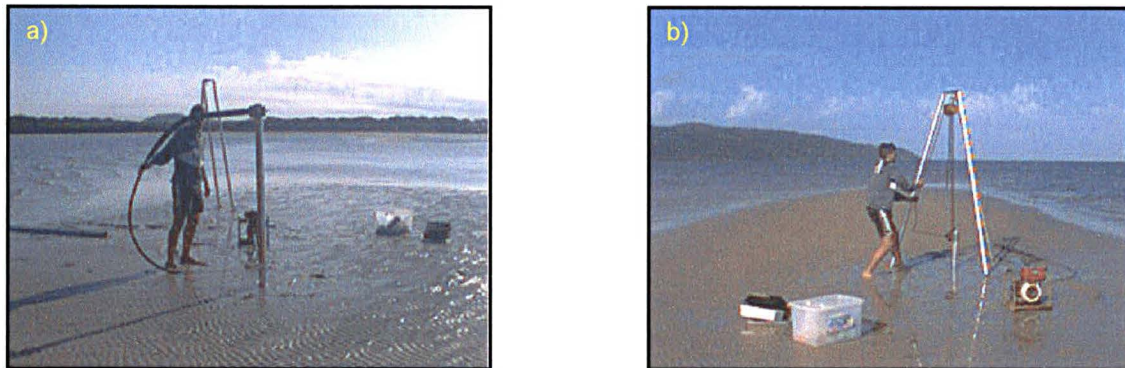


Figura 7.5: Operação de sondagem com vibro-testemunhador sobre uma forma de fundo aflorando na baixamar no Saco do Limoeiro. a) Perfuração utilizando o motor para acionar o vibrador de imersão vinculado ao tubo de sondagem. b) Recuperação do testemunho utilizando tripé e talha.

Esta técnica pode fornecer um testemunho da coluna estratigráfica com até 6 m de comprimento e 3" de diâmetro.

A descrição das sondagens foi feita com os tubos de testemunho cortados em segmentos de 0,5 m e abertos longitudinalmente. Níveis que, a olho nu aparentavam conter sedimentos areno-argilosos ou composição muito variada, foram amostrados para análise granulométrica e determinação de teores de matéria orgânica e de carbonato de cálcio.

Compactação e surgimento de vazios são dois tipos de deformações implícitas no método de sondagem. A compactação é compensada através da medição da diferença de posição do topo do pacote sondado, dentro e fora do tubo de sondagem depois de terminada a penetração. Esta diferença é então distribuída proporcionalmente ao longo de todo o testemunho. O surgimento de vazios no interior do tubo de sondagem ocorre devido ao deslocamento de porções do testemunho por efeito da vibração, do tipo de terreno sondado e da operação de recuperação. Os espaços vazios são então compensados, reajustando-se a posição das porções deslocadas por ocasião do nivelamento dos estratos feita na representação gráfica.

Os segmentos que continham estruturas incipientes ou até maciças, passaram por um processo de realce do contraste textural denominado "*pelling*". Este processo consiste em impregnar de adesivo epóxi a superfície arenosa dos segmentos de sondagem. A diferença de permeabilidade entre lâminas arenosas é realçada pela impregnação do adesivo tornando melhor a visualização de estruturas

incipientes. Estas estruturas ficam registradas na forma de uma placa de adesivo endurecido.

7.2.2. Amostragem com amostrador-em-caixa

Quatro amostras com amostrador-em-caixa (*box-corer*) obtidas sobre a forma de fundo onde foram executadas as sondagens S1 e S2 (Figura 7.3 para localização e Figura 7.5 para ilustração do local), ofereceram uma melhor visualização de algumas das estruturas sedimentares associadas ao substrato do sistema deposicional do Saco do Limoeiro. Dois perfis rasos foram obtidos na crista e outros dois no flanco dorsal dessa forma de fundo.

Amostragem com amostrador-em-caixa proporciona um perfil raso vertical de 20 cm de largura por até 40 cm de profundidade. Este equipamento consiste em uma caixa na forma de cunha com uma face deslizante. Após ter sido enterrado aberto, a face móvel da caixa encerra os sedimentos deslizando em guias e fechando o amostrador (Figura 7.6).

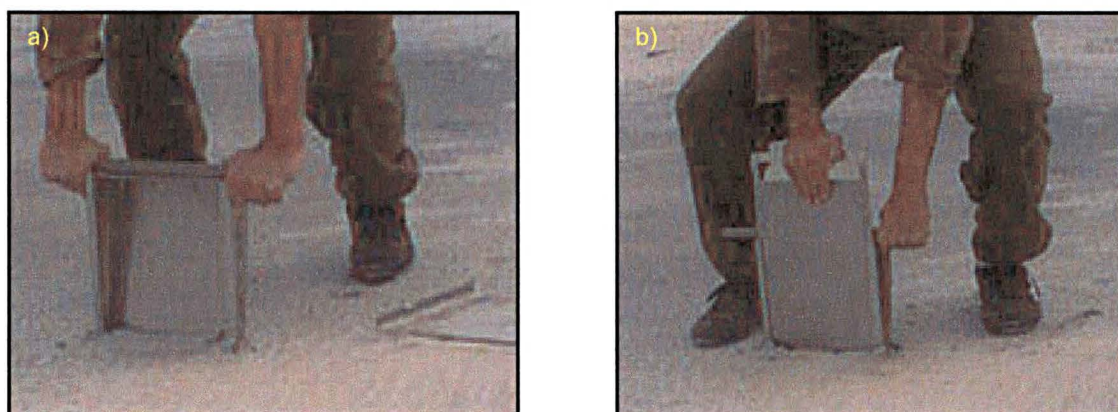


Figura 7.6: Operação de sondagem com amostrador em caixa a) Posicionado para penetração sem a tampa. b) Fechamento da tampa para a recuperação da amostra.

7.2.3. Nivelamento

As estruturas sedimentares descritas nas sondagens e afloramentos foram niveladas com relação ao nível médio do mar para o marégrafo da Ponta do Caraguatá na Ilha do Mel. Conforme DHN (1995), o nível médio do mar para este marégrafo está a 80 cm acima do nível de redução, considerado como sendo o nível médio das baixa mares de sizígia. O zero dos maregramas deste marégrafo está 78 cm abaixo do nível de redução. Sendo assim, as leituras nele feitas devem ser subtraídas de um valor de correção igual a 1,58 m para serem consideradas relativas ao nível médio do mar.

Para o nivelamento das sondagens S5, S6, S7 e dos afloramentos foi utilizado um nível de precisão Nikon AZ-2S para se obter o desnível entre o topo dos afloramentos e sondagens, e o nível d'água no momento do nivelamento. Consultando o maregrama gerado pelo marégrafo da Ponta do Caraguatá no dia do nivelamento, obtém-se a posição do nível d'água no momento de cada nivelamento. Sendo assim, os desníveis medidos em relação ao nível d'água, podem ser relacionados ao nível médio do mar descontando-se o valor de correção (1,58 m).

O nivelamento dos perfis rasos e das sondagens S1, S2, S3, S4 e S8 foi feito por estimativa visual, utilizando como referência o nível da maré baixa observado no momento das sondagens (período de sizígia). Desta maneira, o nivelamento em relação ao nível médio do mar é obtido subtraindo-se o valor de correção (1,58 m) do valor da maré baixa registrado no marégrafo no período da sondagem.

A precisão estimada para ambos os métodos é de ± 20 cm.

7.3. Resultados

Para a apresentação dos resultados das descrições de sondagens e afloramentos, os termos utilizados para definir convenientemente as unidades deposicionais ou níveis de deposição aqui estudados foram baseados nos conceitos propostos por Campbell (1967). Os termos são os seguintes: a) Estratos (*stratum*) são quaisquer unidades deposicionais com características físicas diferenciáveis. b) Lâminas (*lamina*) são os menores estratos notáveis a olho nu, com textura e composição uniforme. c) Camadas (*beds*) são estratos que podem ser homogêneos ou heterogêneos, formados por uma ou mais estruturas sedimentares ou conjunto de lâminas, limitados por superfícies de não deposição, erosão ou que caracterizem mudanças abruptas no processos de sedimentação. d) "Sets" são conjuntos ou grupos de estratos similares.

As análises granulométricas feitas nos níveis onde ocorriam sedimentos de composição variada, indicaram a predominância de areia fina com 66% do peso de cada amostra em média. Sedimentos finos (silte + argila) ocorrem disseminados em cerca de um terço das amostras em concentrações que variam entre 4 e 12%, com exceção da amostra S4c que apresentou 50% de finos. Os teores de carbonato de cálcio variaram entre 1,5 e 10% e ocorrem na forma de fragmentos de conchas compondo as frações maiores que areia grossa (Phi 1). Os teores de matéria orgânica variaram entre 0,2 e 5,7% (Tabela 7.1).

Tabela 7.1: Resultados do processamento estatístico das amostras das sondagens no Saco do Limoeiro. AMG – Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM – Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; M.O. – Matéria orgânica.

Amostra	Média (Phi)	Classificação	Grau de Seleção	% Cascalho	% AMG	% AG	% AM	% AF	% AMF	% Silte	% Argila	% CaCO3	% M. O.
S1a	2,61	Areia fina	Bem selecionado	0,31	0,08	0,20	2,49	87,49	9,44	0,00	0,00	1,57	0,77
S1b	2,92	Areia fina	Moderadamente selecionado	0,11	0,08	0,13	1,54	65,98	19,55	9,09	3,53	3,56	1,84
S1c	2,86	Areia fina	Bem selecionado	0,00	0,00	0,04	0,81	72,74	21,92	1,00	3,50	9,55	0,38
S1d	1,66	Areia média	Moderadamente selecionado	0,00	0,87	19,61	51,03	24,41	4,08	0,00	0,00	1,52	0,39
S2a	2,90	Areia fina	Moderadamente selecionado	1,04	0,26	0,29	1,95	67,33	20,62	6,00	2,50	3,80	1,71
S2b	2,78	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,02	0,43	1,53	82,10	15,92	0,00	0,00	3,24	1,18
S4a	2,26	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	3,53	96,22	0,25	0,00	0,00	4,05	1,17
S4b	2,45	Areia fina	Moderadamente selecionado	0,00	0,00	0,24	1,45	91,12	1,68	2,01	3,51	4,94	2,15
S4c	4,35	Silte grosso	Pobrememente selecionado	0,00	0,00	0,00	3,67	42,95	2,92	45,31	5,15	8,30	5,69
S4d	1,85	Areia média	Pobrememente selecionado	0,00	3,98	13,99	40,91	26,56	1,07	9,00	4,50	5,72	2,34
S4e	2,32	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,57	0,76	6,79	91,13	0,74	0,00	0,00	2,77	0,78
S5a	2,23	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,19	16,77	82,67	0,37	0,00	0,00	2,97	1,37
S5b	2,03	Areia fina	Bem selecionado	0,00	0,76	3,08	43,01	52,61	0,54	0,00	0,00	2,86	1,17
S5c	2,21	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,30	18,07	81,13	0,50	0,00	0,00	2,57	0,78
S5d	2,16	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	23,96	75,63	0,40	0,00	0,00	2,37	0,59
S6a	2,02	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	47,00	52,58	0,42	0,00	0,00	3,35	0,39
S6b	2,04	Areia fina	Bem selecionado	0,00	0,25	1,10	42,25	56,01	0,39	0,00	0,00	2,96	0,58
S6c	2,19	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,38	20,14	78,99	0,49	0,00	0,00	2,37	0,19
S6d	2,25	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	13,47	86,18	0,35	0,00	0,00	2,57	0,39
S6e	2,34	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	9,98	89,37	0,65	0,00	0,00	2,57	0,39
S7a	1,95	Areia média	Bem selecionado	0,00	0,61	2,88	55,05	41,21	0,25	0,00	0,00	2,97	0,20
S7b	1,82	Areia média	Bem selecionado	0,00	0,84	4,17	60,45	34,54	0,00	0,00	0,00	2,77	1,17
S7c	1,70	Areia média	Moderadamente selecionado	0,00	2,09	12,75	52,38	32,50	0,27	0,00	0,00	2,37	0,58
S7d	2,33	Areia fina	Muito bem selecionado	0,00	0,00	0,00	8,81	90,84	0,34	0,00	0,00	2,46	0,19
média	2,34	Areia fina	Pobrememente a muito bem selecionado	0,06	0,43	2,52	21,96	66,76	4,30	3,02	0,95	3,51	1,10

7.3.1. Afloramentos e sondagens na Ilha do Mel

Os afloramentos descritos na Ilha do Mel têm até 4,3 m de altura e apresentam uma porção de topo com até 70 cm de espessura, formada por areia fina branca sem estrutura visível e repleta de raízes, que corresponde à parte pedogeneizada do perfil.

Abaixo da porção pedogeneizada, até cerca de +1 m de elevação, ocorrem estratificações plano-paralelas horizontais e sub-horizontais. Estas estruturas são notadas por contraste textural evidenciado por intemperismo ou diferença de coloração causada: ou por impregnação de matéria orgânica epigenética, ou por concentração de minerais pesados. Estas estratificações são mais evidentes nas porções basais e incipientes em direção ao topo. Tubos fósseis, com diâmetro externo entre 1 cm e 2 cm, estão presentes em todos os afloramentos.

Segundo Angulo (1992) a média granulométrica nos afloramentos da Ilha do Mel variam entre 0,23 e 0,29 mm (Φ 2,5 e 2).

Na base dos afloramentos A2 e A4 ocorrem *sets* com mais de 70 cm de espessura, de estratificações cruzadas planares com inclinação entre 10° e 20°. A direção de inclinação dessas estruturas indicam um fluxo trativo rumando em média para 330° (NNW). Seu limite superior varia entre +2,0 m e +1,3 m de elevação. O limite inferior não foi observado (Figuras 7.7 e 7.8).

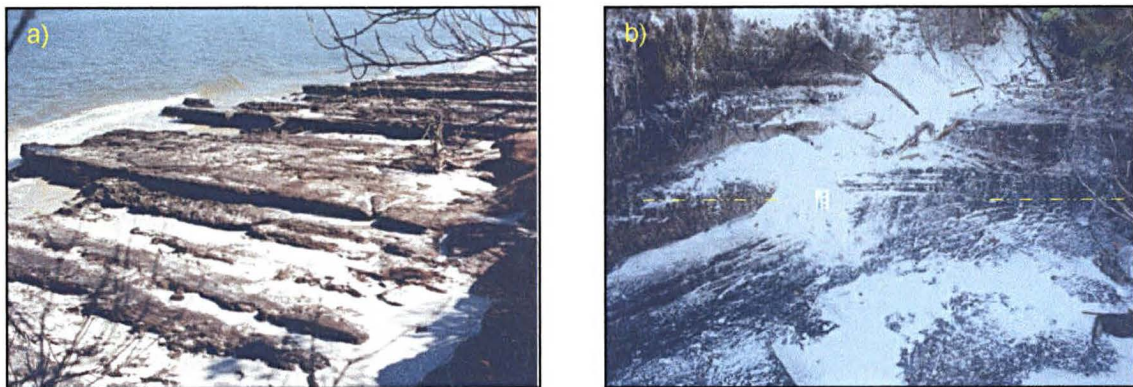


Figura 7.7: a) Vista panorâmica do afloramento A2 onde se observam os planos inclinados das estratificações cruzadas planares. b) Contato entre as estratificações plano-paralelas no topo (Unidade B) e as estratificações cruzadas planares na base (Unidade A) do afloramento A2. Para localização ver figura 7.3.

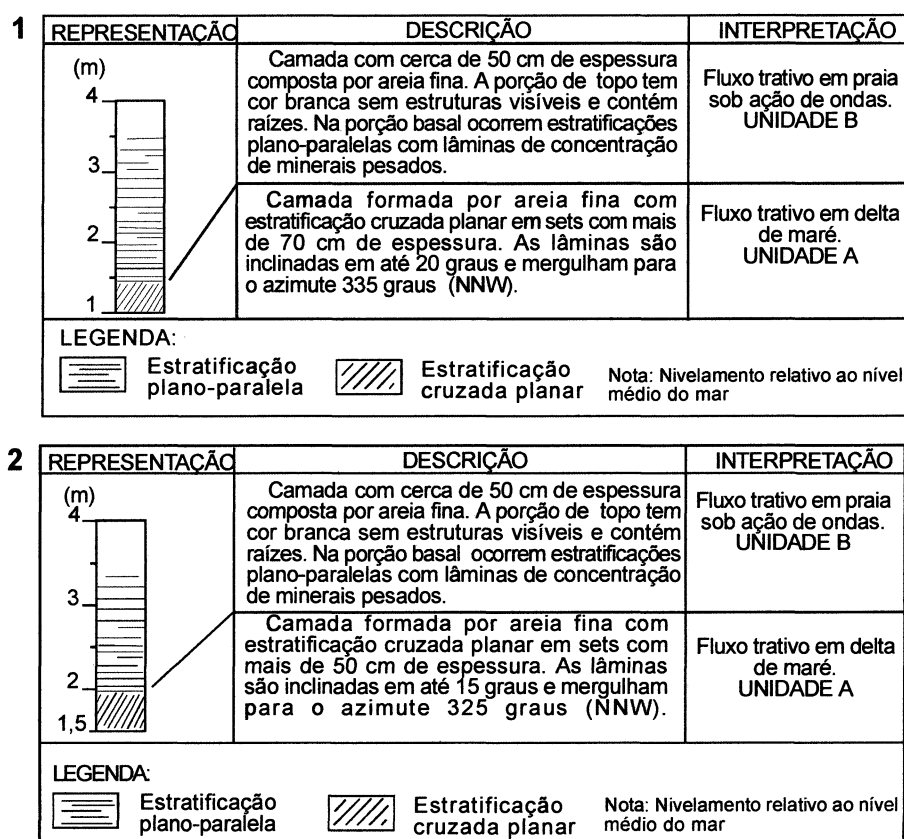


Figura 7.8: Representação esquemática, descrição e interpretação das estruturas sedimentares dos afloramentos A2 (1) e A4 (2). Para localização ver figura 7.3.

Nos afloramentos e sondagens A1/S5, A3/S6 e A5/S7, predomina a areia fina e ocorrem dispersos em todos os testemunhos tubos fósseis com até 2 cm de diâmetro externo.

As estruturas sedimentares apresentam-se da seguinte maneira:

Acima de +1 m ocorrem estratificações plano-paralelas que torna-se incipientes em direção ao topo.

Entre +1 m e +0,7 m de elevação, estruturas sedimentares não são visíveis. Já entre +0,7 m e +0,2 m de elevação, ocorrem marcas de ondas evidenciadas por truncamentos entre lâminas curvas. Ocasionalmente também ocorrem estratificações plano-paralelas horizontais e sub-horizontais, lâminas planas horizontais e planas inclinadas em até 20° indicando a ação de fluxo trativo associado (Figura 7.9).

Na sondagem S5 ocorrem entre +0,2 e -0,7 m de elevação, lâminas planas inclinadas em até 20° com areia média, indicando a presença de sets com até 7 cm de espessura de estratificações cruzadas planares (Figura 7.10). Direções de mergulho opostas são observadas nestas estruturas que podem ser interpretadas como produto de fluxo trativo ocasionado pela ação de correntes.

Abaixo de -2,5 m estratificações plano-paralelas horizontais e sub-horizontais são visíveis apenas através de realce com decalque de adesivo epóxi (Figura 7.11).

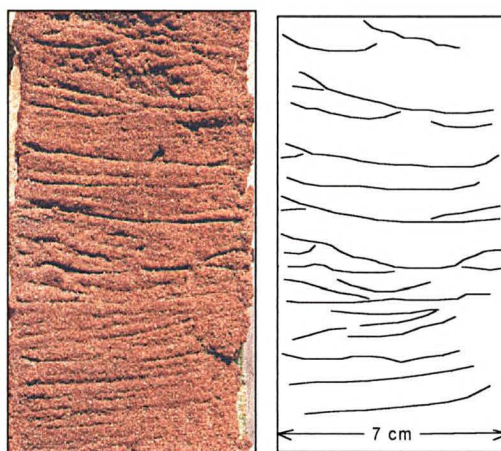


Figura 7.9: Estratificação cruzada truncada por onda evidenciada por truncamentos entre lâminas curvas, em decalque de adesivo epóxi no segmento da sondagem S5, com base a +0,5 m de elevação.

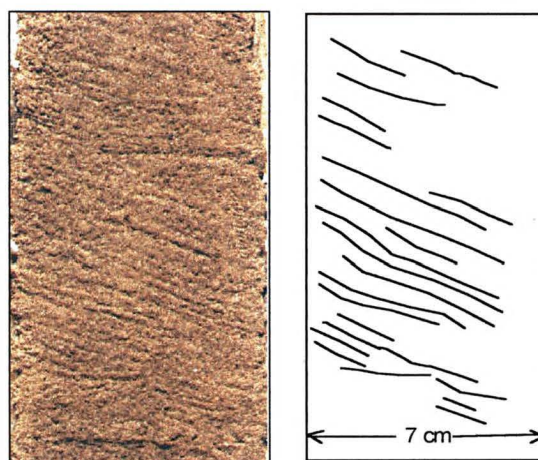


Figura 7.10: Estratificação cruzada evidenciada por lâminas inclinadas em até 20°, em decalque de adesivo epóxi, do segmento da sondagem S5, com base a -0,5 m de elevação.

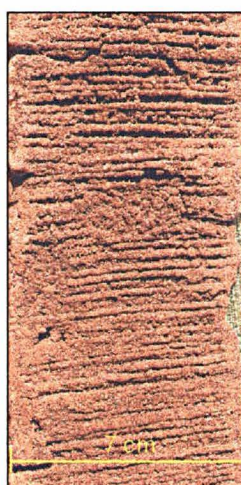


Figura 7.11: Estratificação plano-paralela horizontal e sub-horizontal em decalque de adesivo epóxi no segmento da sondagem S6, com base a -0,6 m de elevação.

A representação esquemática dos afloramentos e sondagens A1/S5, A3/S6 e A5/S7, com a granulometria, descrição das estruturas sedimentares e interpretação, é apresentada nas figuras 7.12, 7.13 e 7.14.

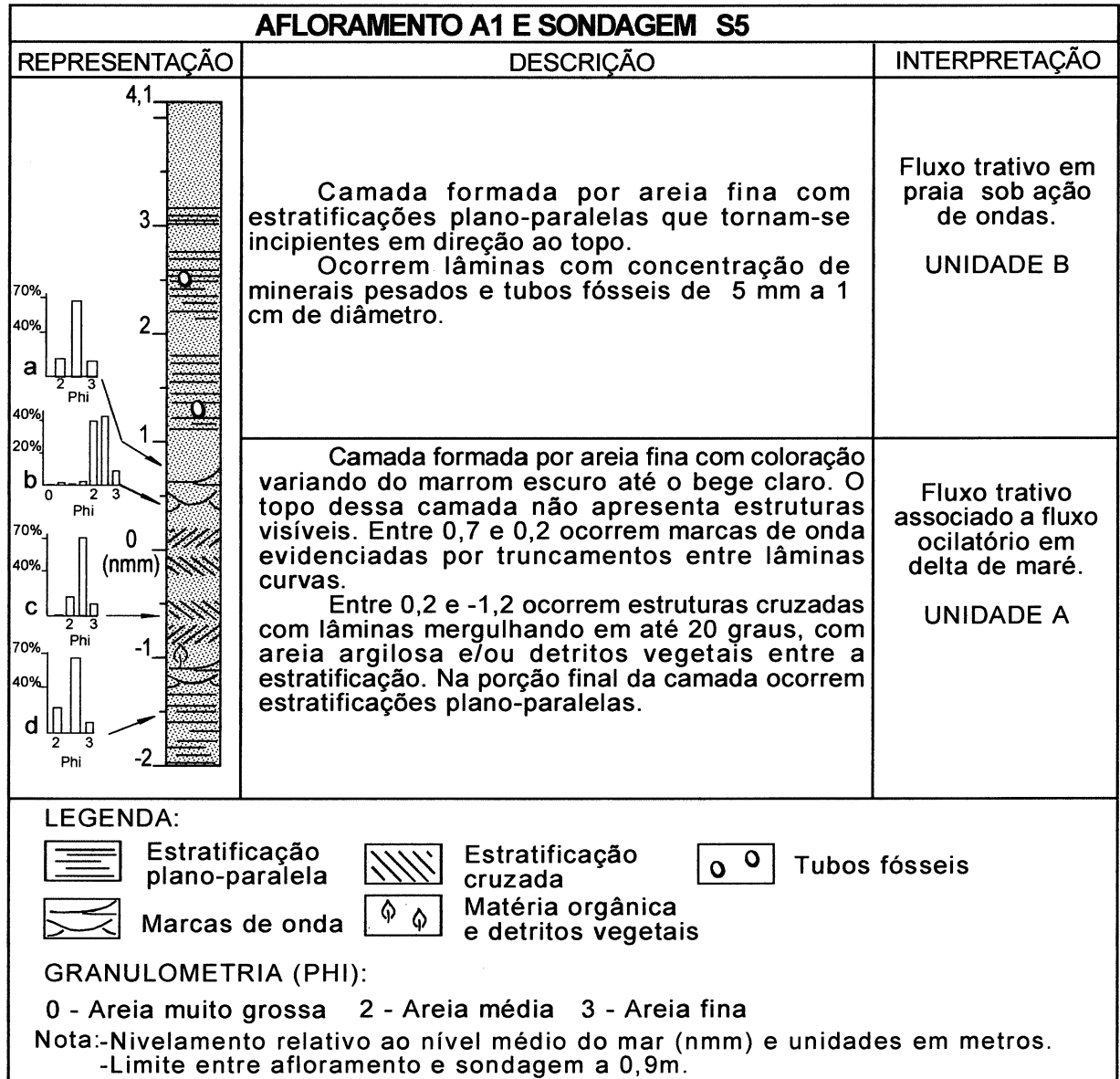


Figura 7.12: Representação esquemática, descrição e interpretação do afloramento A1 e da sondagem S5. Ver localização na figura 7.3.

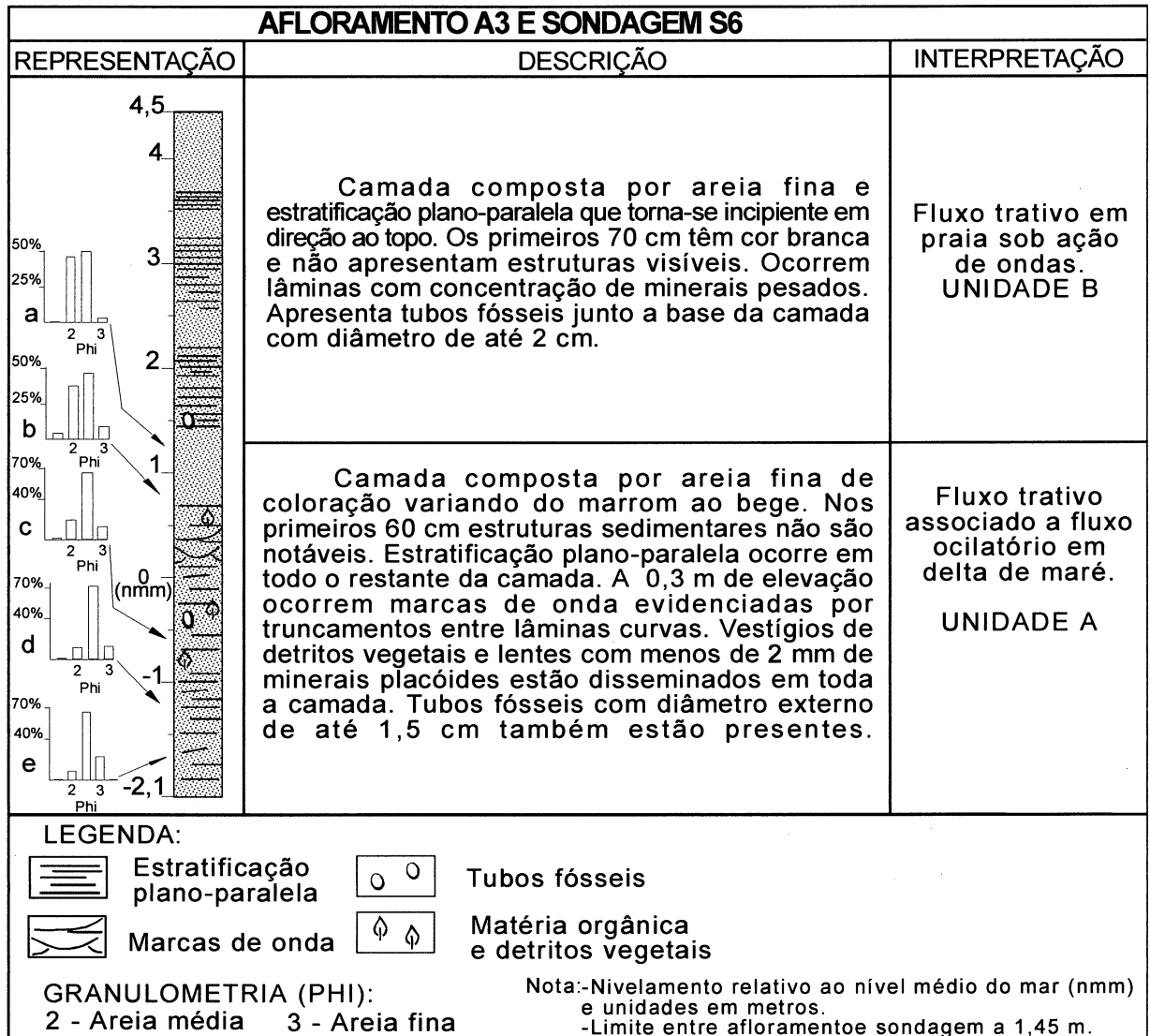


Figura 7.13: Representação esquemática, descrição e interpretação do afloramento A3 e da sondagem S6. Ver localização na figura 7.3.

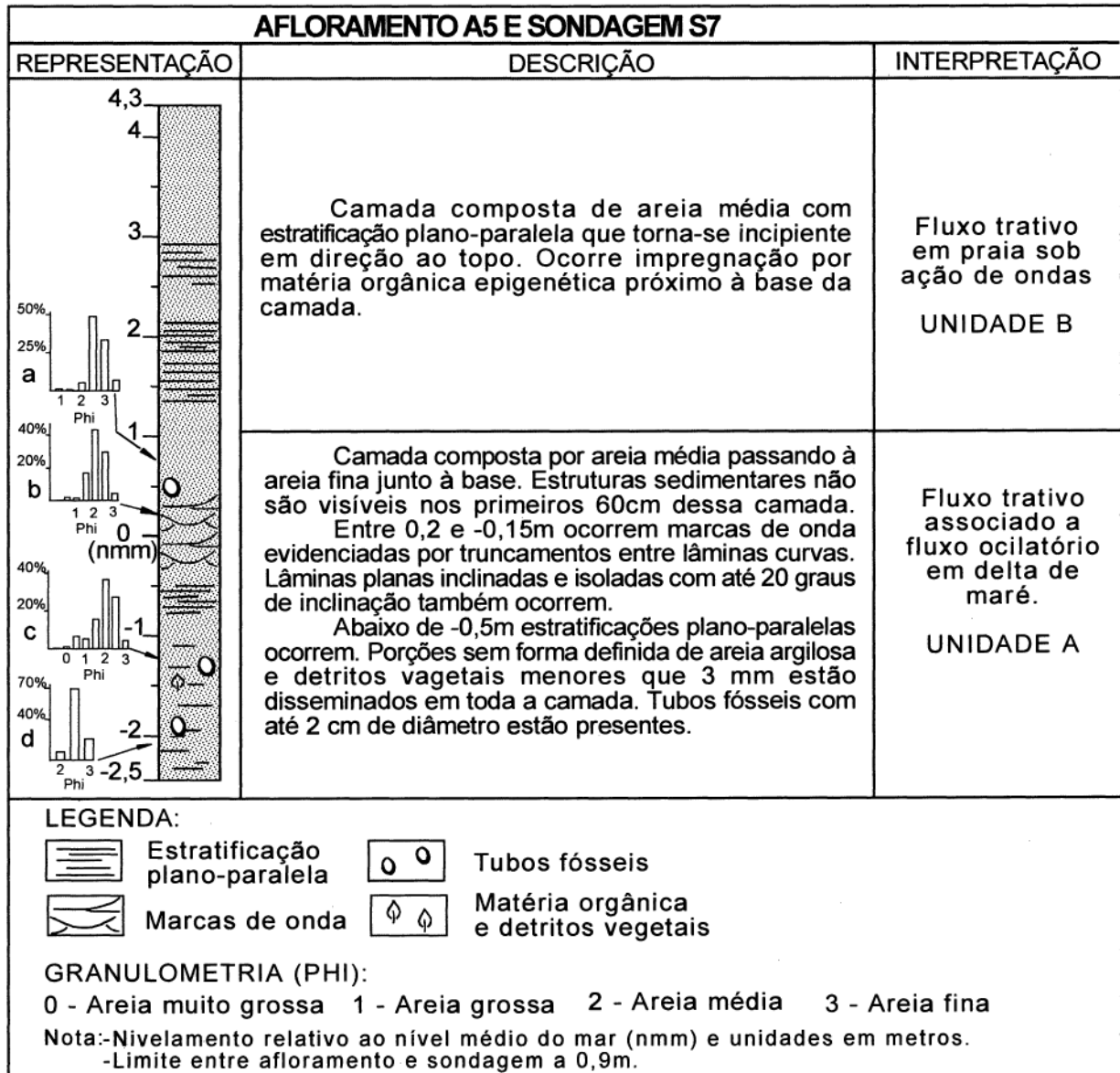


Figura 7.14: Representação esquemática, descrição e interpretação do afloramento A5 e da sondagem S7. Ver localização na figura 7.3.

7.3.2. Sondagens no Saco do Limoeiro

Nas sondagens feitas no Saco do Limoeiro (S1, S2, S3 e S4) foram identificadas três camadas distintas, denominadas nesta descrição de camada de topo, camada intermediária e camada basal.

Os sedimentos da camada de topo possuem coloração variando do cinza escuro ao negro devido à presença de matéria orgânica reduzida, tornando-se bege claro por oxidação em exposição ao ar. Não apresenta estrutura sedimentar visível e fragmentos de conchas são abundantes (Figura 7.15). A espessura dessa camada de topo varia entre 65 e 85 cm e seu limite basal é sempre bem definido.

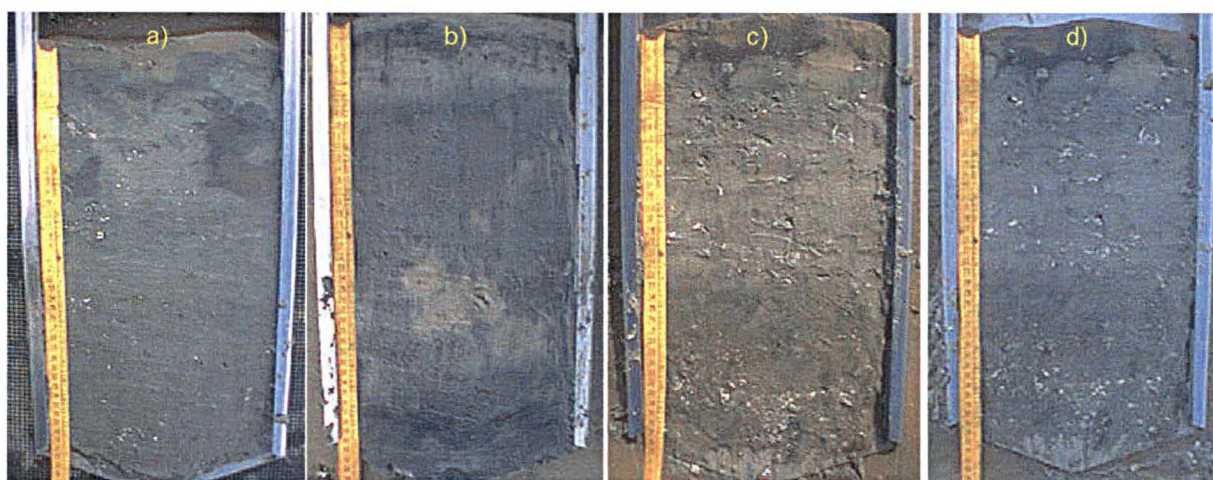


Figura 7.15: Perfis rasos obtidos com amostrador em caixa apresentando os primeiros 40 cm da camada de topo. As amostragens foram feitas na crista (a e b) e flanco dorsal (c e d) da forma de fundo onde se deram as sondagens S1 e S2 (ver localização na figura 7.3).

Na camada intermediária predominam estruturas heterolíticas ocorrendo de duas maneiras: a) alternância entre porções sem forma definida de areia argilosa, argila e porções de areia fina, dispostas de maneira irregular devido a intensa bioturbação (Figura 7.16), b) lâminas irregulares e descontínuas de argila com até 3 cm de espessura intercaladas a areia fina (Figura 7.17). A espessura da camada intermediária variou entre de 1,5 m e 3,5 m. Junto ao limite inferior dessa camada, ocorre em todos os testemunhos um estrato de até 20 cm de espessura onde concentram-se conchas fragmentadas e inteiras (Figura 7.18). Através de uma datação por radiocarbono, uma idade de 2.850 ± 30 anos A.P. foi determinada para conchas retiradas da base da camada intermediária da sondagem S4.

Na camada basal estruturas sedimentares são escassas. Nas sondagens S1 e S2 ocorrem lâminas de areia média a grossa com até 10 cm de espessura entre

-3,5 e -4,5 m de elevação. Algumas estratificações plano-paralelas incipientes também estão presentes. Detritos vegetais, bolas de argila e porções sem forma definida de areia argilosa, podem aparecer de maneira esparsa ou concentradas em algumas porções (Figura 7.19). Tubos fósseis com até 2 cm de diâmetro externo estão presentes nessa camada (Figura 7.20).

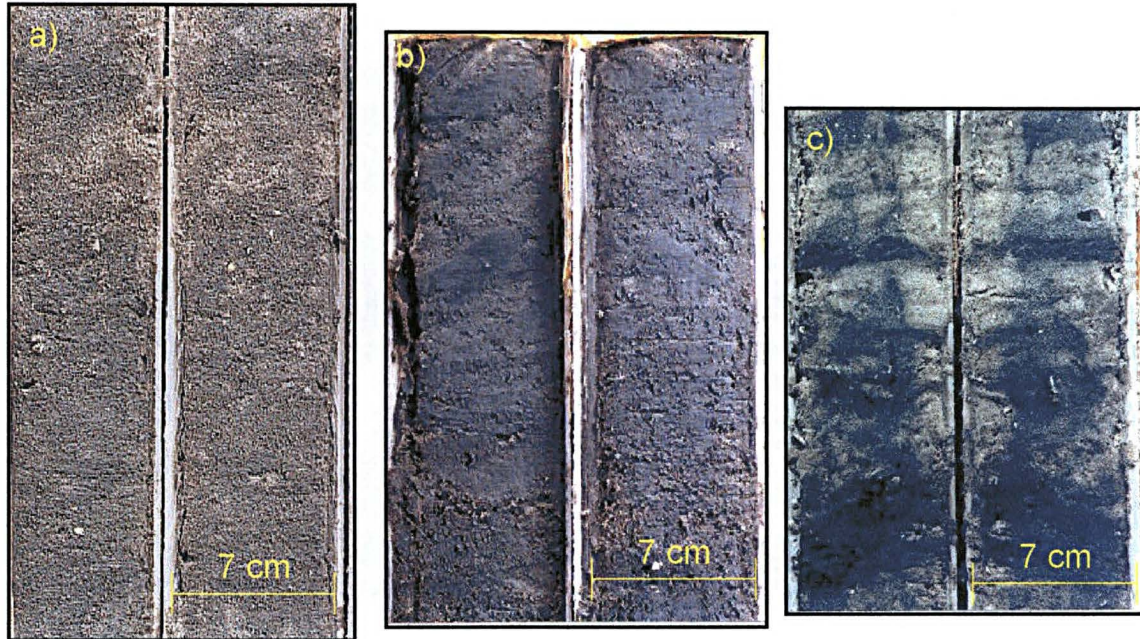


Figura 7.16: Estrutura heterolítica evidenciada por alternância entre porções sem forma definida de argila arenosa e areia fina. a) Segmento da sondagem S4 (elevação a -2,7 m). b) Segmento da sondagem S4 (elevação a -3,2 m). c) Segmento da sondagem S1 (elevação a -1,5 m).

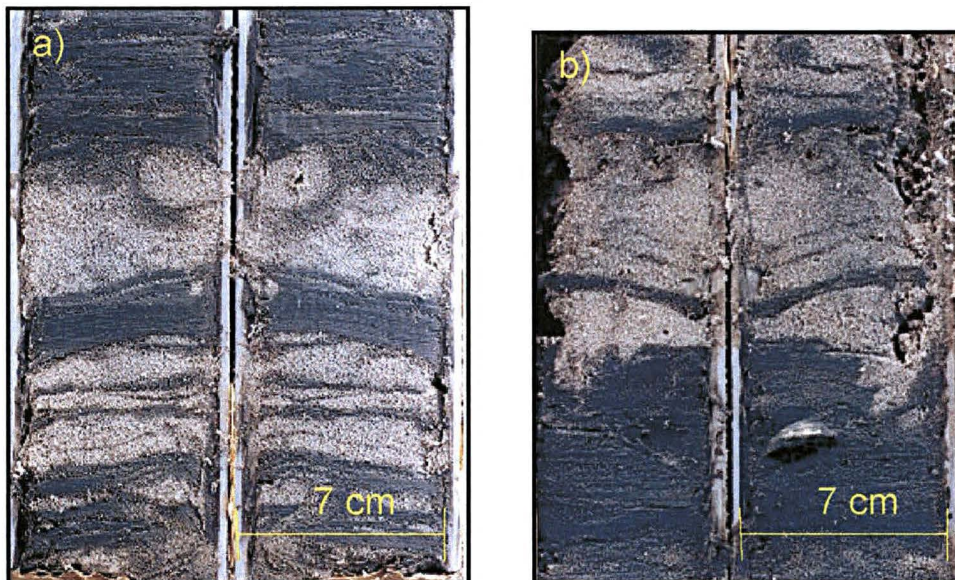


Figura 7.17: Estrutura heterolítica evidenciada por estratos irregulares e deformados de argila arenosa na sondagem S4. a) Estratos inclinados e sinuosos (elevação a -2,1 m). b) Estratos descontínuos e curvados (elevação a -2,3 m).

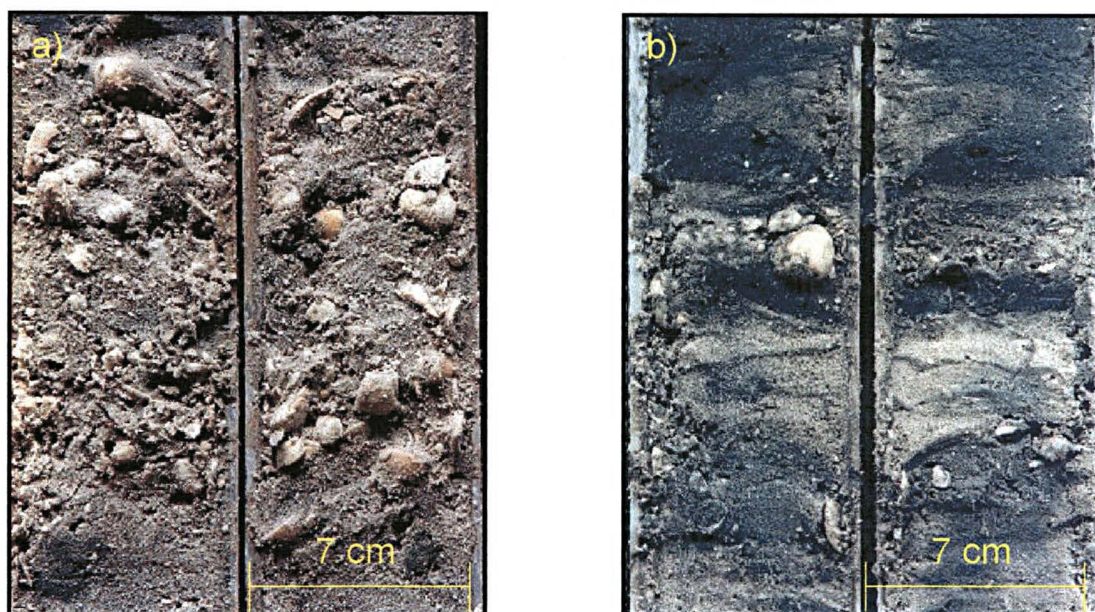


Figura 7.18: Segmentos de sondagem apresentando a maneira de ocorrência dos estratos com concentração de conchas. a) Estrato de conchas mais espesso encontrado na sondagem S3 (elevação a cerca de -1,8 m). b) Estrato de conchas menos espesso encontrado na sondagem S1 (elevação a cerca de -1,8 m).

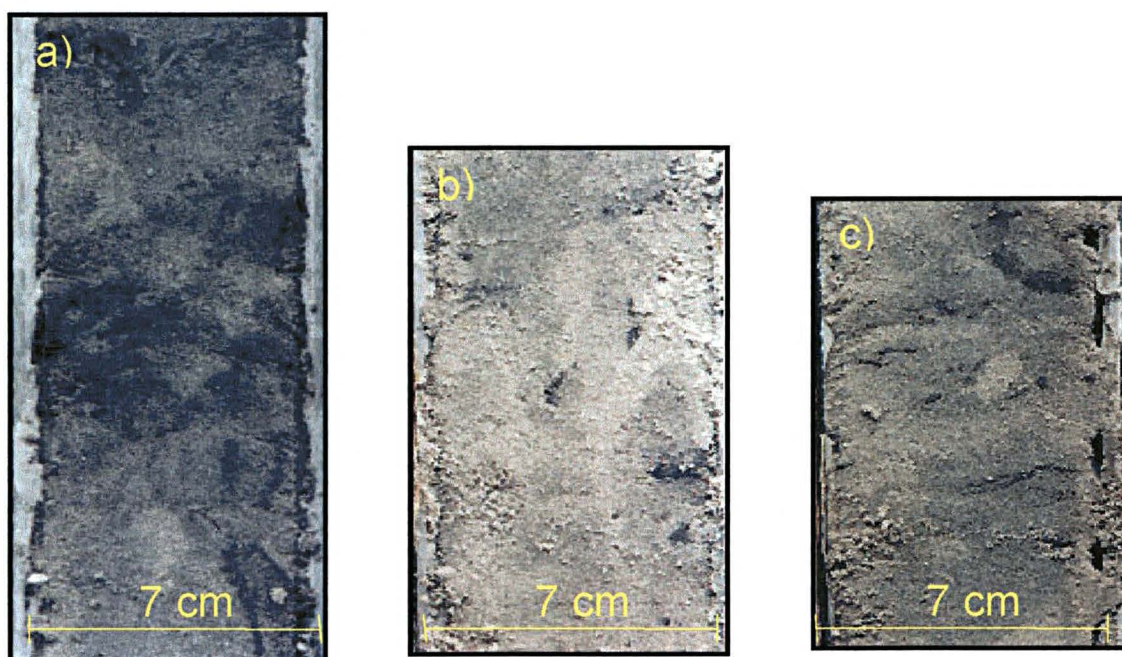


Figura 7.19: a) Segmento de sondagem apresentando porções sem forma definida de areia argilosa, detritos vegetais e bolas de argila (segmento da sondagem S1 a -3,5 m de elevação). b) Detritos vegetais e bolas de argila (segmento da sondagem S2 a -3,2 m de elevação). c) Tubos fósseis, lentes de areia argilosa e detritos vegetais (segmento da sondagem S2 a +2,8 m).

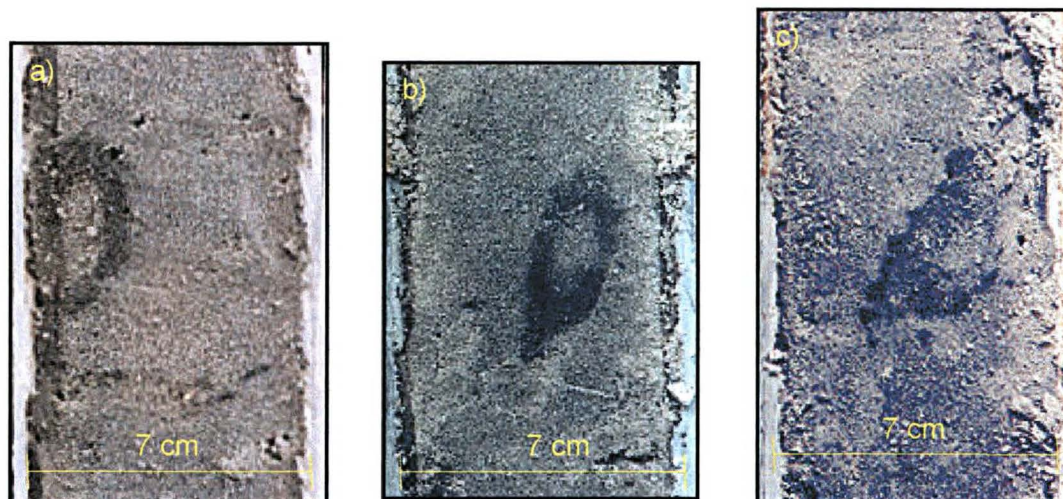


Figura 7.20: Diferentes tipos de ocorrência de tubos fósseis. a) segmento da sondagem S4 a -4,2 m de elevação. b) segmento da sondagem S1 a -2,6 m de elevação. c) Segmento da sondagem S2 a -2,9 m de elevação.

A representação esquemática das sondagens S1, S2, S3 e S4 com a granulometria, descrição das estruturas sedimentares e interpretação, constam nas figuras 7.21, 7.22, 7.23 e 7.24.

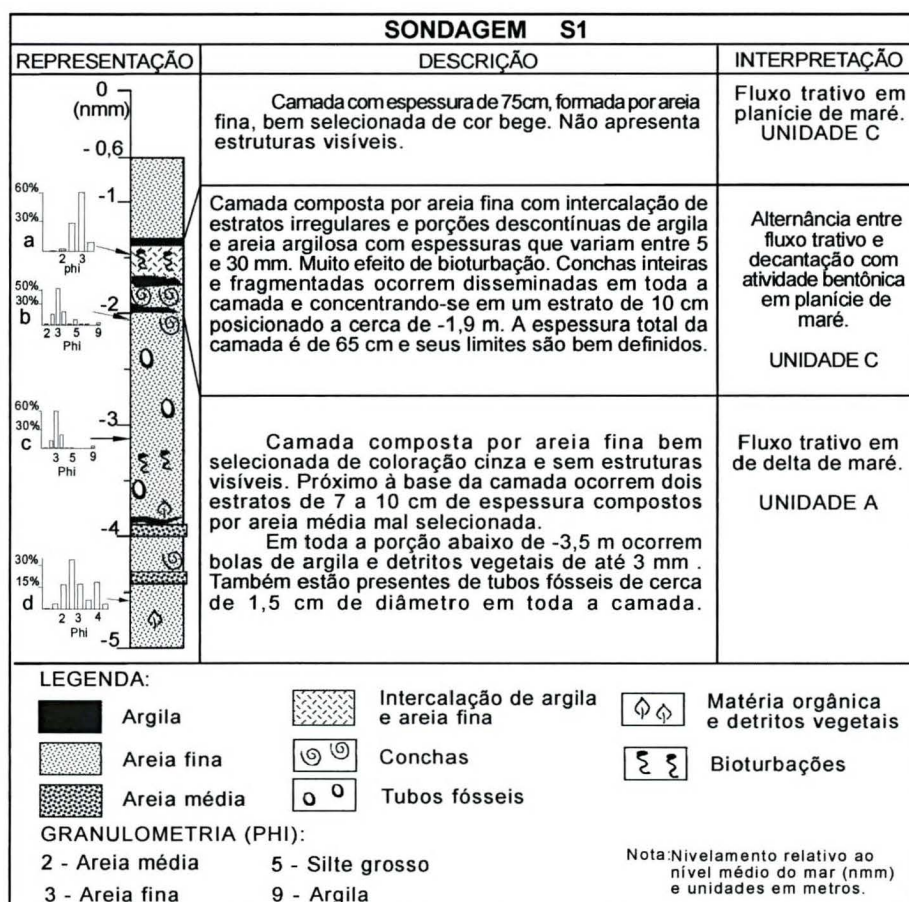


Figura 7.21: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S1. Ver localização na figura 7.3.

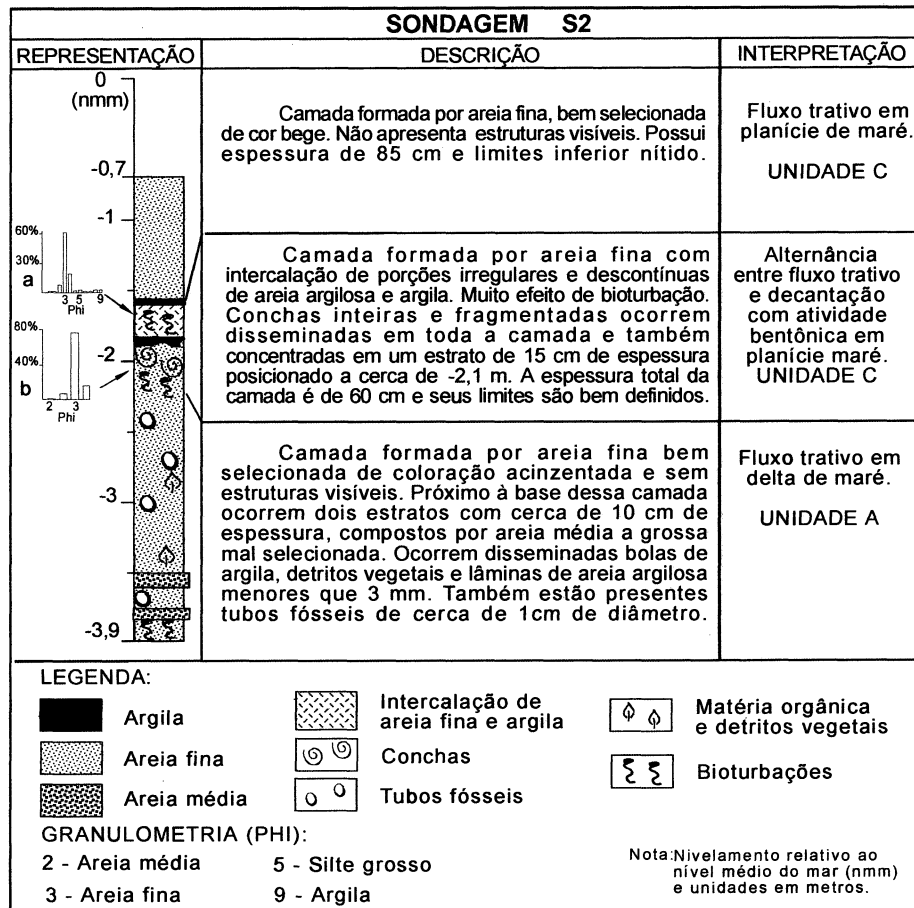


Figura 7.22: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S2. Ver localização na figura 7.3.

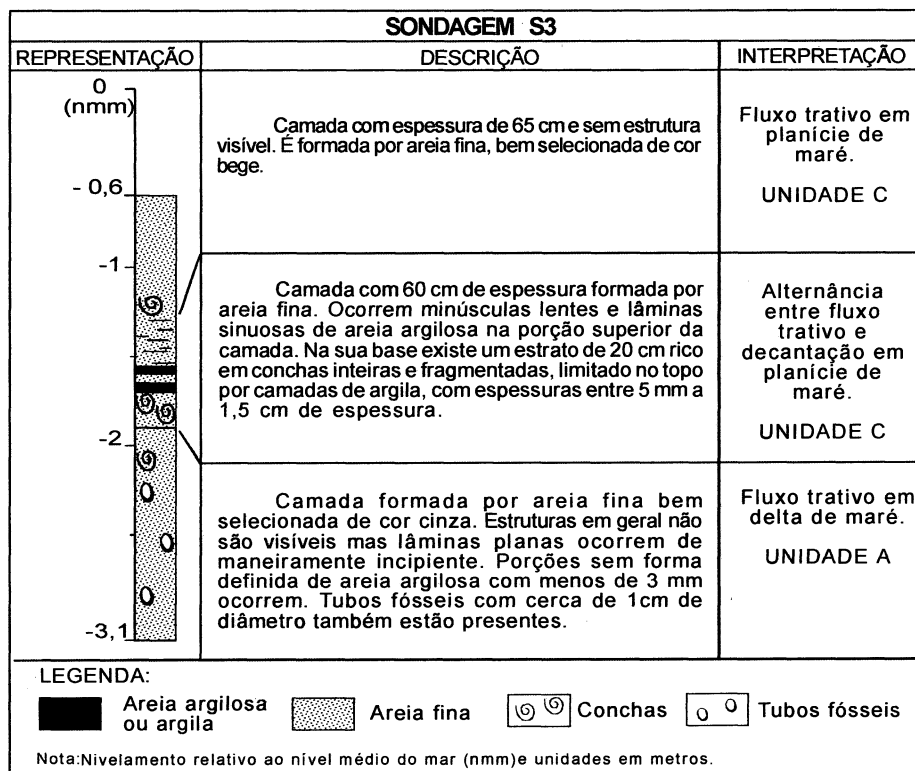


Figura 7.23: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S3. Ver localização na figura 7.3.

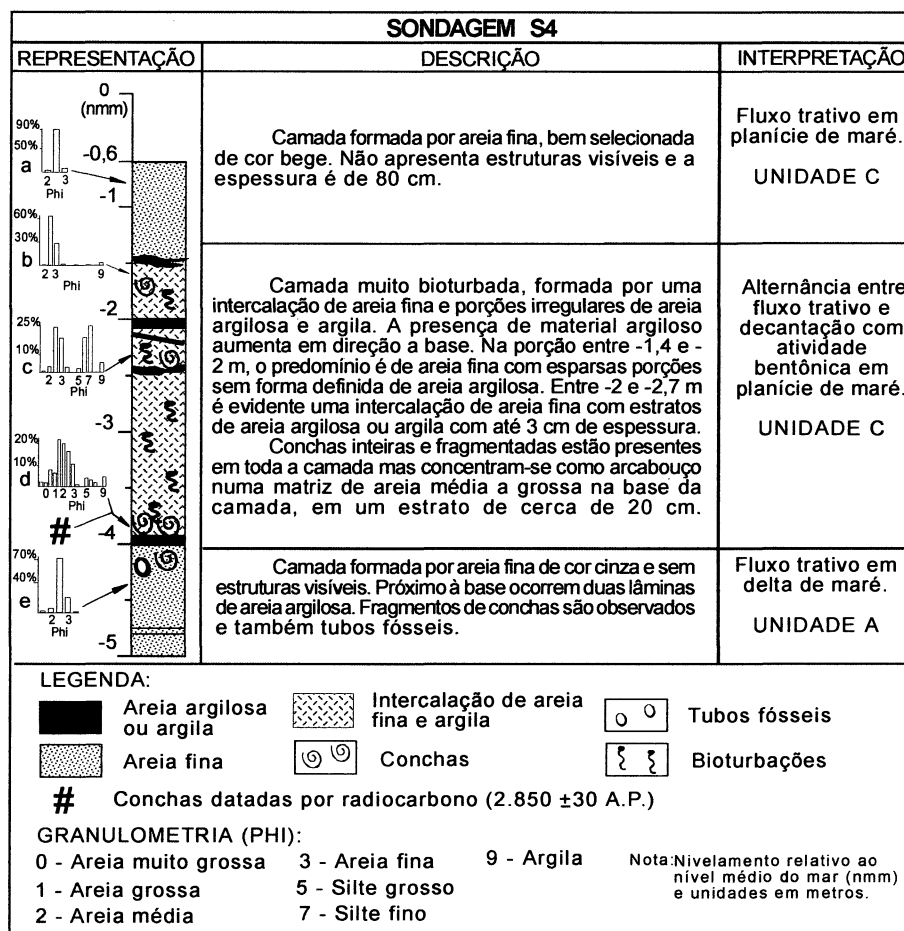


Figura 7.24: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S4. Ver localização na figura 7.3.

7.3.3. Sondagem na planície arenosa próxima ao canal da DNOS

Na sondagem feita sobre a planície arenosa próxima ao canal da DNOS (S8), ocorrem duas camadas com transição difusa formadas por areia fina. A camada de topo não possui estruturas sedimentares visíveis. Na camada de base ocorrem de maneira esparsa, lâminas descontínuas com até 3 mm de espessura, evidenciadas pela presença de detritos vegetais ou argila. Um tubo fóssil com menos de 1 cm de diâmetro está presente (Figura 7.25).

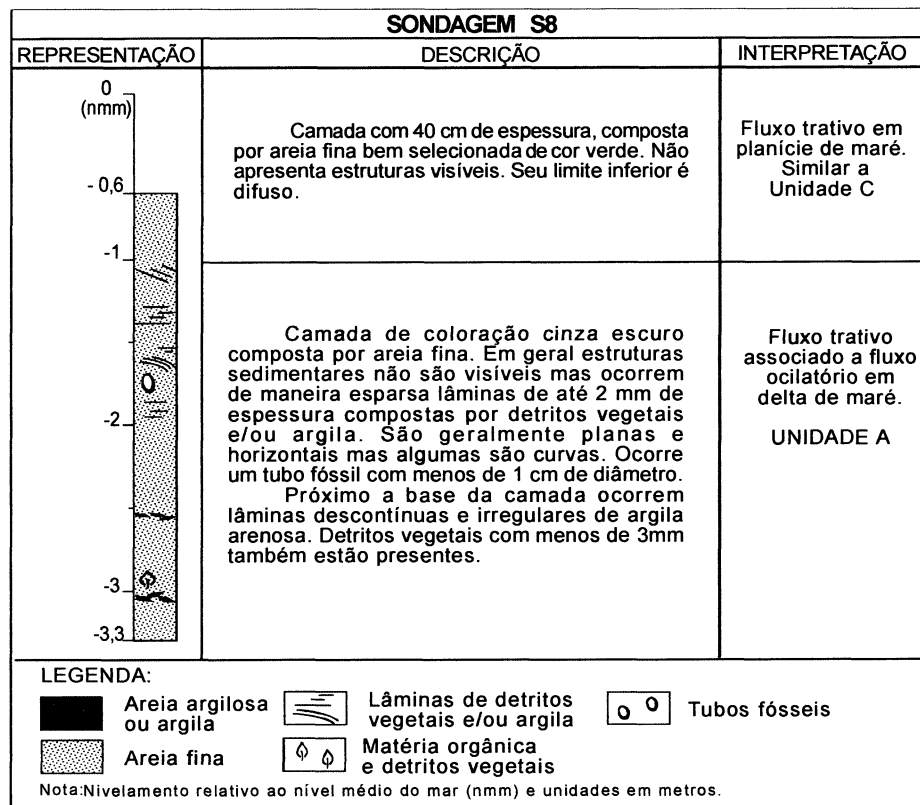


Figura 7.25: Representação esquemática, descrição e interpretação da sondagem S8. Ver localização na figura 7.3 e 7.4.

7.4. Discussões

7.4.1. Unidades sedimentares

A partir do conjunto de estruturas sedimentares e padrão textural observados nas sondagens e afloramentos, três unidades sedimentares foram identificadas e apresentadas a seguir da base para o topo.

Unidade A: É caracterizada pela ocorrência de tubos fósseis; estratificações cruzadas de grande porte com lâminas frontais com direção de mergulho indicando migração de dunas subaquosas para o interior do estuário; estratificações cruzadas de pequeno porte com variadas direções de mergulho; e estratificações cruzadas truncadas por onda. Esta unidade tem mais de 7 m de espessura. Sua porção entre +1,5 m e -2,5 m de elevação ocorre nos afloramentos A2 e A4, e nos afloramentos e sondagens A1/S5, A3/S6 e A5/S7. O restante dessa unidade está representado entre -2,0 m e -5,0 m nas sondagens S1, S2, S3, S4, e S8.

As estruturas indicam associação de processos de sedimentação decorrentes da ação de fluxos trativos e oscilatórios que permitem interpretar a Unidade A como sendo formada em ambiente de delta de maré enchente. Esta associação de estruturas pode também ser encontrada na face litorânea de ambientes praias. No entanto, a interpretação dessa unidade como sendo formada em delta de maré enchente é reforçada por Lessa *et al.* (2000), que descreveram nas proximidades da Ilha do Mel, estruturas cruzadas planares semelhantes as descritas na porção superior da Unidade A, e interpretaram-nas como sendo parte do registro de um delta de maré enchente. Além disso Angulo *et al.* (1999) interpretaram estratos com estratificação cruzada truncada por onda como podendo ser produto da ação de ondas pequenas em ambientes rasos e protegidos. Segundo Davies (1994), em ambientes de deltas de maré enchente há uma intensa ação de correntes de marés e pouca ação ondas.

Unidade B: É caracterizada pela ocorrência de tubos fósseis e predominância de estratificações plano-paralelas horizontais e sub-horizontais, com estratos com concentração de minerais pesados. Essa unidade ocorre em afloramentos ocupando o topo da estratigrafia da barreira holocênica na Ilha do Mel, com espessuras de até 3,4 m e elevações entre +4,3 m e +1,0 m.

Estratificações plano-paralelas horizontais e sub-horizontais podem ser interpretadas como sendo formada por um processo sedimentar de fluxo trativo, em regime superior sobre leito plano (Angulo *et al.* 1999, Lessa *et al.* 2000). Estes processos são comuns na face de praia de ambientes praias, indicando que a Unidade B foi formada neste ambiente.

Unidade C: Apresenta uma camada de base e uma de topo com limites bem definidos. A camada de base é caracterizada por estruturas heterolíticas, evidenciadas por uma intercalação de areia fina, areia argilosa e argila, em porções sem forma definida ou lâminas irregulares e descontínuas, muito perturbadas por bioturbação. Está representada nas duas camadas superiores das sondagens S1, S2, S3 e S4. Seu limite superior está em média a -0,6 m de elevação. Já seu limite inferior teve grande variação em relação a porção amostrada na área de estudo. Na parte leste do Saco do Limoeiro a elevação do limite inferior variou entre -1,9 e -2,1 m. Na parte oeste, a elevação desse limite está a -4,1 m. Sendo assim, sua

espessura média na parte leste é de 1,5 m enquanto que na parte oeste chega a 3,5 m. Já a camada de topo não apresenta estruturas visíveis, é rica em fragmentos de conchas e tem cerca de 70 cm de espessura.

A Unidade C distingue-se das unidades A e B pela ausência de tubos fósseis e pela grande ocorrência argila. Suas estruturas sedimentares sugerem uma combinação entre processos sedimentares de decantação e processos de fluxo trativo.

A camada arenosa de topo da Unidade C tem uma espessura semelhante ao valor da altura das ondas de areia registradas no levantamento batimétrico. A migração de uma dessas formas de fundo em momentos de ativação de processos de fluxo trativo, sepultaria lentamente as superfícies onde predominam processos de decantação e intensa atividade bentônica como nas cavas entre formas de fundo de grande porte.

Segundo Allen (1980), a migração das ondas de areia com superfícies suaves de baixa declividade não ocasionam separação no fluxo superficial, e formam estruturas sedimentares com intercalações de areia e argila (Figura 7.26). As estruturas descritas por Allen (1980) sob efeito de uma intensa atividade bentônica produziria estruturas semelhantes as descritas na camada de base da Unidade C.

Lessa *et al.* (2000) interpretaram estruturas similares às encontradas na camada de base da Unidade C como sendo formadas em ambientes de planície de maré. No entanto, as características geomorfológicas do Saco do Limoeiro são de um campo de ondas de areia ou, segundo Angulo (1999), de um hemi-delta de maré enchente. Desse modo, o registro geológico dos processos sedimentares que ocorrem no Saco do Limoeiro (Unidade C), pode ser interpretado como sendo o de um campo de ondas de areia ou hemi-delta de maré enchente, que apresenta estruturas sedimentares similares às de uma planície de maré.

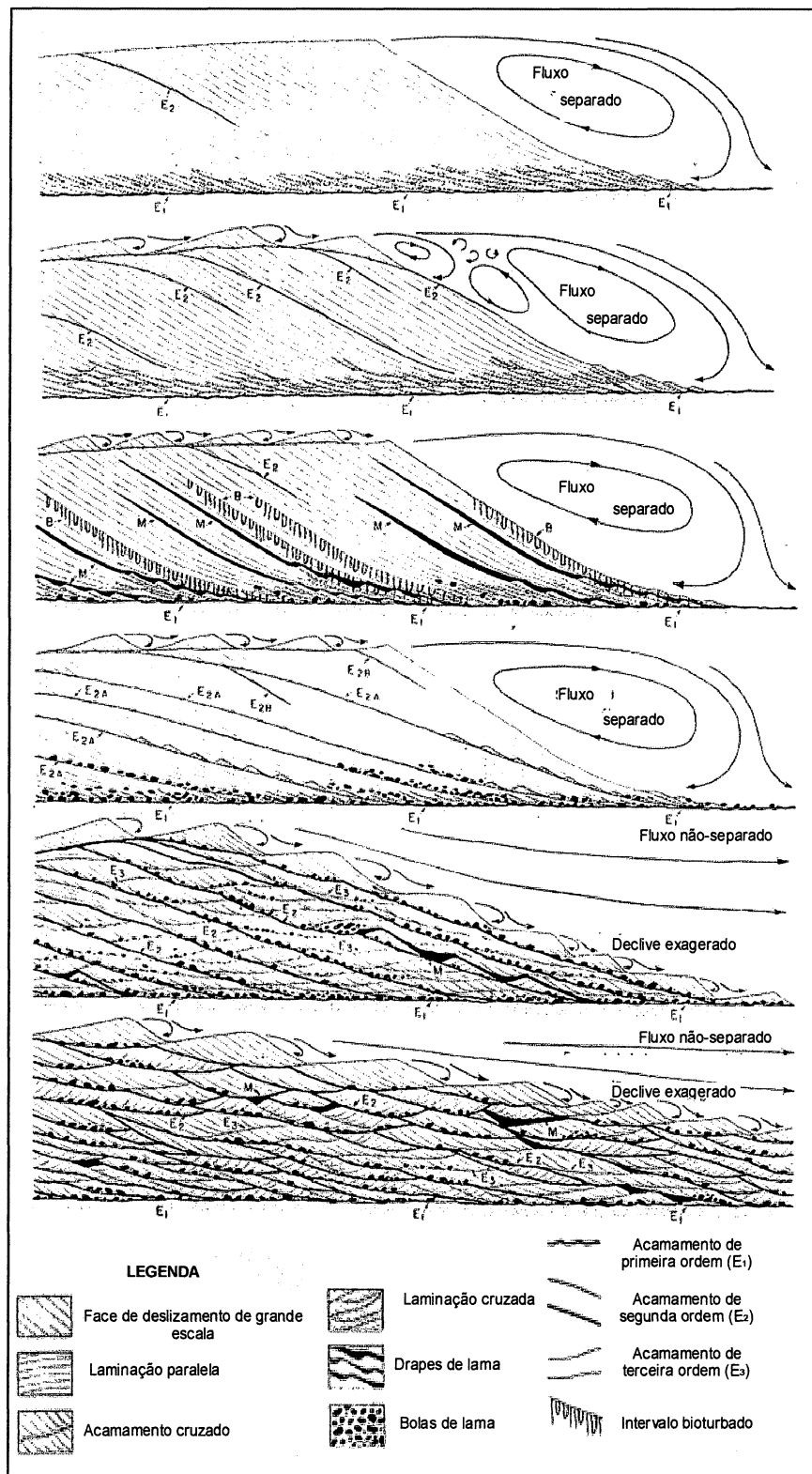


Figura 7.26: Registro sedimentar previsto para dunas subaquosas e ondas de areia. O autor separou duas classes de ondas de areia e dunas subaquosas distintas pela ocorrência ou não de separação do fluxo sobre seus foresets. O fluxo não separado ocorre onde há uma suave declividade nos foresets. (modificado de Allen, 1980).

7.4.2. Evolução paleogeográfica

Conforme Lessa *et al.* (2000) a barreira holocênica na planície costeira de Paranaguá está assentada sobre sedimentos paleo-estuarinos holocênicos e possui uma espessura entre 10 m e 12 m. O arranjo estratigráfico mais comum na porção de topo dessa barreira é face de praia sobreposta a face litorânea (Figura 7.1). No entanto, afloramentos descritos na Ilha Guaraguaçu, na porção nordeste da barreira holocênica próximo a desembocadura da Baía de Paranaguá (afloramentos G,J e I na figura 7.2), apresentam um arranjo estratigráfico com face de praia sobre delta de maré enchente.

Segundo Lessa *et al.* (1998), que estudaram o preenchimento holocênico do estuário da Baía de Paranaguá, uma grande intrusão de sedimentos arenosos de origem marinha teria ocorrido nos estágios finais da última transgressão. Estes sedimentos estariam relacionados ao desenvolvimento de um grande delta de maré enchente, cujo registro geológico forma a maior parte da Ilha do Guaraguaçu (Figura 4.5).

Os sedimentos da Unidade A, interpretados como depositados em delta de maré enchente, corroboram a hipótese de que, nas imediações da Ilha do Mel e Ilha do Guaraguaçu, havia uma desembocadura onde desenvolveu-se um grande delta de maré enchente nos estágios finais da última transgressão. Próximo à época em que teve início a atual regressão, uma praia de mar aberto teria emergido sobre esse delta de maré, sobrepondo depósitos de face de praia (Unidade B) sobre depósitos de delta de maré enchente (Unidade A), construindo o que hoje é a Ilha do Mel e parte da planície costeira holocênica em Pontal do Sul (com. pess.)*. Na planície arenosa ao lado do canal da DNOS, a camada basal da sondagem S8 revelou estruturas semelhantes as da Unidade A indicando uma continuidade dessa unidade até o continente em Pontal do Sul. Segundo Lessa *et al.* (2000) sedimentos paleo-estuarinos holocênicos formam o embasamento da barreira holocênica (unidades A e B).

O Saco do Limoeiro (Unidade C) desenvolveu-se na forma de um prisma com cerca de 4 m de espessura em sua porção mais espessa e antiga, e com 2 m de espessura na sua porção mais recente, próxima a margem da Ilha do Mel. Esse prisma ocupa uma plataforma na forma de um embaçamento que

- *Guilherme Camargo Lessa:
- UFBA, Curso de Pós-Graduação em Geologia, R. Caetano Moura 123, Salvador (BA) 40210-340.
Tel.: (071) 237-0408; Fax: (071) 247-3004. E-mail: glessa@pppg.ufba.br

teria evoluído através da erosão de pelo menos 60 milhões de m³ de sedimentos das unidades A e B no topo da barreira holocênica (Figura 7.27).

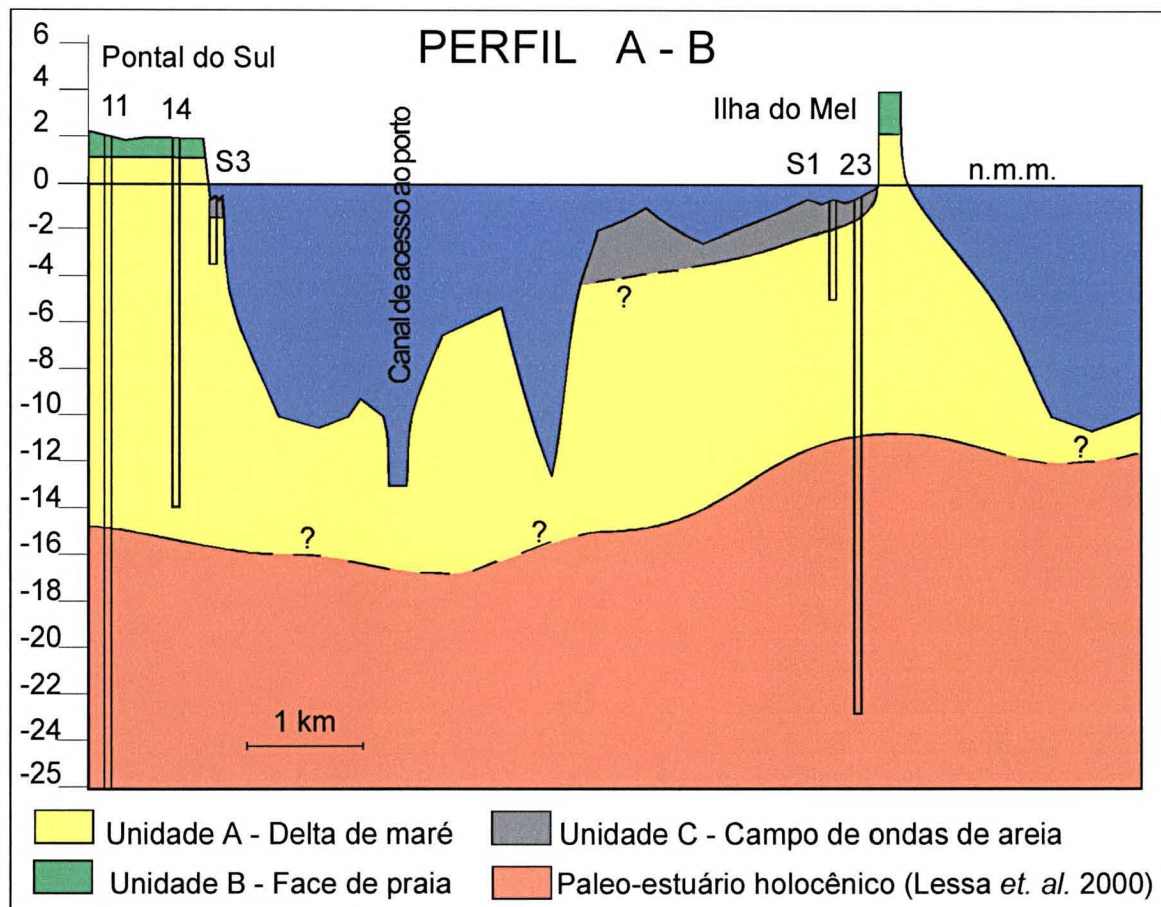


Figura 7.27: Perfil estratigráfico transversal ao setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá, com unidades sedimentares interpretadas para a barreira holocênica e seu limite inferior marcado por sedimentos paleo-estuarinos representados nas sondagens 11, 14 e 23 obtidas em Lessa *et. al.* (2000). Para localização ver figura 7.3).

Os sedimentos do Saco do Limoeiro começaram a depositar-se depois de formada a Ilha do Mel e junto com o início do fenômeno de erosão que formou o espaço onde a Unidade C está assentada. Essa erosão seria decorrente de um fenômeno natural de circulação estuarina, ocasionado pela interação entre correntes de maré e os pontais rochosos da ponta sul da Ilha do Mel.

Durante a evolução geomorfológica da Ilha do Mel, quando já estava estabelecido o canal principal da desembocadura sul da Baía de Paranaguá, entre a Ilha do Mel e a Ilha da Galheta, as correntes de maré enchente teriam começado a interagir com os pontais rochosos do extremo sul da Ilha do Mel. Essa interação ocasionaria uma deflexão turbulenta do fluxo para a direita, iniciando um processo de erosão na margem sudoeste da Ilha do Mel, até estarem formadas as enseadas

do Saco do Limoeiro e da Praia de Encantadas como são atualmente (Figura 7.28). A datação por radiocarbono feita em conchas da base da Unidade C na sua porção mais antiga, indica que o processo de sedimentação no Saco do Limoeiro teria se iniciado por volta de 2.850 ± 30 anos A.P.

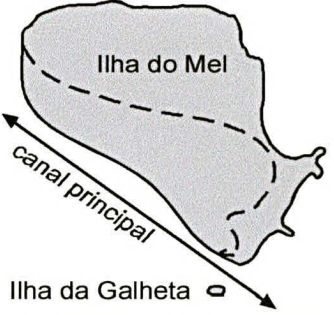
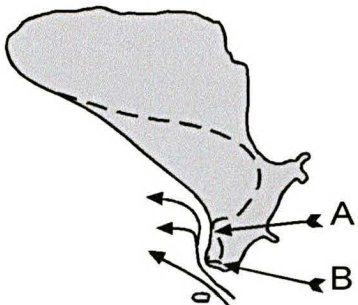
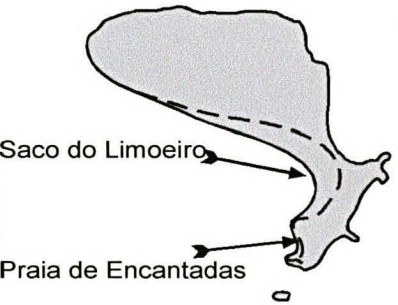

 <p>Ilha do Mel</p> <p>canal principal</p> <p>Ilha da Galheta</p>	<p>SITUAÇÃO INICIAL</p> <p>O início do processo de dá com o canal principal da desembocadura sul da baía de Paranaguá já está estabelecido entre a Ilha do Mel e Ilha da Galheta.</p>
 <p>A</p> <p>B</p>	<p>SITUAÇÃO INTERMEDIÁRIA 1</p> <p>As correntes de maré enchente começam a interagir com os pontais rochosos A e B ocasionando uma deflexão do fluxo para a direita iniciando a erosão da margem sudoeste da Ilha do Mel.</p>
 <p>Saco do Limoeiro</p> <p>Praia de Encantadas</p>	<p>SITUAÇÃO INTERMEDIÁRIA 2</p> <p>Feições de enseada começam a se delinear no Saco do Limoeiro e na Praia de Encantadas.</p>
 <p>Ilha do Mel</p> <p>Ilha da Galheta</p>	<p>SITUAÇÃO ATUAL</p> <p>O Saco do Limoeiro e da Praia de Encantadas assumem a forma que possuem atualmente.</p>

Figura 7.28: Modelo de evolução geomorfológica da enseada do Saco do Limoeiro.

Segundo Hicks & Hume (1996) a presença de pontais rochosos nas imediações de desembocaduras influenciam a forma de deltas de marés quando ocasionam deflexão do fluxo de correntes de marés.

Feições geomorfológicas semelhantes ao Saco do Limoeiro ocorrem também em outras partes do mundo como nos embaixamentos da margem norte da desembocadura de Whangarei Harbour na Ilha Norte, Nova Zelândia (Figura 7.29), onde desenvolveram-se feições batimétricas semelhantes as encontradas no Saco do Limoeiro, como um canal principal junto a um pontal rochoso (ver também a figura 5.9 para comparação das feições batimétricas).

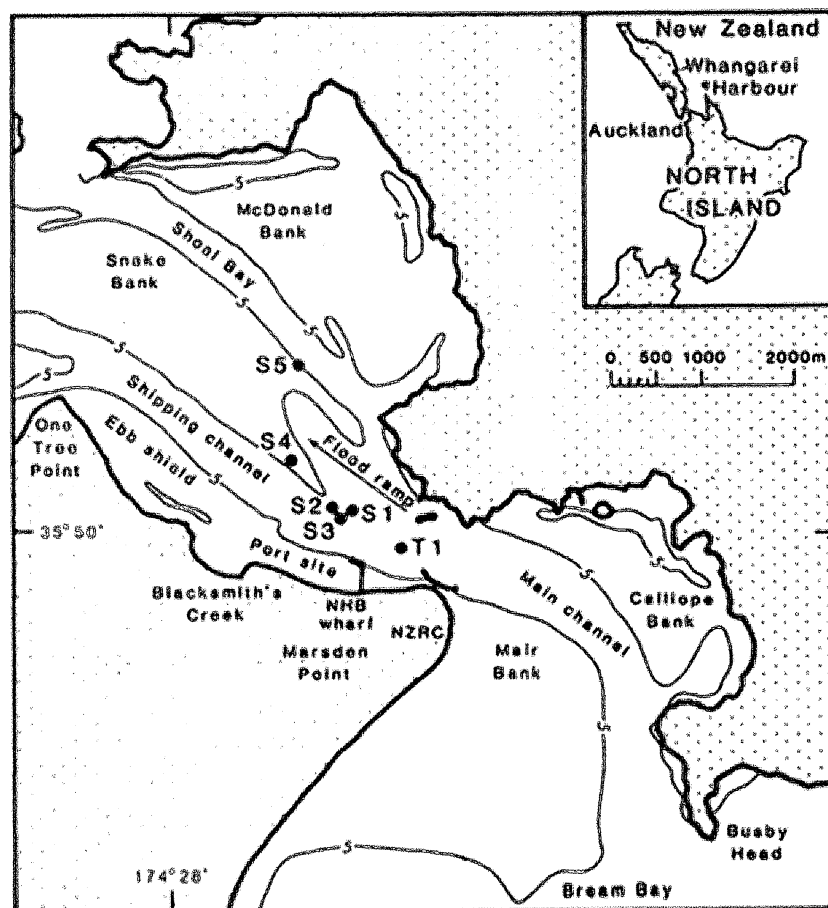


Figura 7.29: Desembocadura de Whangarei Harbour na Ilha Norte, Nova Zelândia onde desenvolveram-se feições batimétricas semelhantes as encontradas no Saco do Limoeiro (Black & Healey, 1986).

8. A DINÂMICA SEDIMENTAR NO SACO DO LIMOEIRO E SUA RELAÇÃO COM O SETOR INTERNO DO CANAL DA GALHETA

A dinâmica sedimentar no Saco do Limoeiro apresenta indícios de que é dominada por processos sedimentares, controlados por agentes que atuam em escalas de tempo distintas.

Com base em fotos aéreas Angulo (1999) interpretou o sentido de migração de formas de fundo como sendo para o interior do estuário, conforme os sentidos das correntes de enchente. No entanto, o levantamento hidrodinâmico indicou que as correntes de maré no Saco do Limoeiro, durante ciclos de maré de sizígia em condições de mar calmo, tendem a transportar sedimentos principalmente no sentido das correntes de vazante. Essa aparente contradição pode ser explicada através da atuação de processos sedimentares, governados por condições oceanográficas distintas.

Durante condições de mar calmo o sentido das correntes de maré capazes de transportar sedimentos, indica que o transporte de sedimentos ocorre segundo orientações de vazante. Por outro lado, o sentido de migração das formas de fundo seguindo as orientações das correntes de enchente, sugeridas pelas interpretações das fotos aéreas, podem ser decorrentes de eventos episódicos com grande energia. Estes eventos aumentariam a capacidade de agentes como ondas que adentram o estuário e correntes de maré, transportarem sedimentos no sentido de enchente. Segundo Marone & Camargo (1994) uma situação como esta pode ocorrer quando o nível da maré fica acima do previsto, devido a passagem de frentes frias provenientes de sul-sudeste. Eventos como estes poderiam influenciar na dinâmica das correntes de maré, fazendo com que ondas de areia e mega-ondulações transportem sedimentos episodicamente, migrando no sentido das correntes de enchente.

Junto às margens da Ilha do Mel existe uma praia estuarina que segundo Paranhos (1996), é formada por sedimentos que variam de areia fina a areia média, erodidos das margens da Ilha do Mel e retrabalhados pela ação de ondas que penetram no estuário. Além disso, os sedimentos que formam o Saco do Limoeiro estão depositados na forma de um prisma encaixado numa plataforma, formada pela erosão de sedimentos da Ilha do Mel. Sendo assim, a principal fonte de sedimentos arenosos para o Saco do Limoeiro parece ter sido as margens da Ilha do Mel, com a

praia estuarina atuando como um sistema transitório entre o Saco do Limoeiro e a Ilha do Mel. Desta forma, podemos concluir que o Saco do Limoeiro tem a longo prazo um balanço sedimentar negativo, tendendo a exportar sedimentos arenosos para o setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá.

No entanto, pode-se considerar que o setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá, pode atuar também como fonte secundária de sedimentos arenosos durante os eventos episódicos de grande energia, que ativam a migração das ondas de areia e mega-ondulações no sentido das correntes de maré enchente, invertendo o sentido de transporte que ocorre em condições de mar calmo. Para processos de transporte por suspensão, a falta de uma fonte de sedimentos finos (silte + argila) na Ilha do Mel e a presença acentuada dos mesmos, tanto nas cavas de formas de fundo quanto no registro sedimentar, indica que o Saco do Limoeiro importa sedimentos finos atuando como armadilha para partículas em suspensão nas águas do estuário.

No setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá, foi dragado o canal que dá acesso ao Porto de Paranaguá, denominado Canal da Galheta nas imediações desta desembocadura. Segundo Lamour (2000), o Canal da Galheta tem problemas de assoreamento no setor interno da desembocadura, por ter sido escavado sobre um banco arenoso, que desviava para sudoeste um canal natural que havia antes da dragagem. Este banco arenoso foi interpretado como sendo formado por sedimentos ali depositados pela diminuição na intensidade das correntes de maré, devido ao aumento da área da seção do estuário naquele trecho.

Como o Saco do Limoeiro tem tendência a exportar sedimentos a longo prazo, principalmente em condições de mar calmo, sedimentos dele provenientes e retrabalhados pela dinâmica no setor interno da desembocadura sul da Baía de Paranaguá podem contribuir também para o assoreamento do Canal da Galheta.

9. CONCLUSÕES

Os sedimentos do fundo do Saco do Limoeiro são compostos em geral por 95% de grãos terrígenos, estando 74% de seu peso representado na fração areia fina. Fragmentos de conchas (4%) e matéria orgânica (1%) somam o restante da composição média destes sedimentos. As frações granulométricas silte e argila ocorrem em teores entre 5% e 10%, podendo atingir até 30% do peso de uma amostra. A presença de silte e argila está geralmente associada a cavas de formas de fundo ou porções abrigadas como a parte leste do Saco do Limoeiro.

Ocorrem pelo menos quatro tipos de formas de fundo que foram separadas em três classes: a) ondas de areia (*sand waves*) com comprimento de onda entre 50 e 200 m, amplitudes entre 50 e 80 cm, e cristas orientadas entre NNE e NNW. b) mega-ondulações (*mega-ripples*) com duas ordens de grandeza sendo as maiores, com comprimento de onda entre 10 e 50 m e cristas orientadas entre NNE e NNW; e as menores, com comprimentos de onda de até 10 m, com cristas orientadas entre SSW-NNE e SW-NE, ambas com amplitudes menores que 25 cm. c) marcas onduladas simétricas (*ripples*) com comprimento de onda entre 8 cm e 12 cm, e alturas entre 1,5 cm e 4 cm.

A comparação entre um mapa de isóbatas de 1998 e um mosaico de fotos aéreas de 1980 permitiu concluir que num período de 18 anos, as ondas de areia que desenvolvem-se sobre a rampa de enchente tiveram um deslocamento mínimo de 3 m/ano, e as da porção leste do Saco do Limoeiro deslocaram-se no mínimo 1,3 m/ano. Estes deslocamentos parecem ocorrer seguindo direções de enchente (NW).

As correntes de maré mais intensas, medidas num ciclo de maré de sizígia durante condições de mar calmo, ocorreram na rampa de enchente nos períodos de vazante (43,8 cm/s), sendo que a média nesse local foi de 24,2 cm/s. No canal principal de enchente a média foi de 20,4 cm/s e a velocidade máxima medida foi 27,8 cm/s. O cálculo do limiar de movimentação dos grãos indica que os sedimentos não-coesivos do Saco do Limoeiro iniciam sua movimentação quando as velocidades de correntes atingem o valor de 15,8 cm/s, medido a 50 cm do fundo.

As características das correntes capazes de transportar sedimentos não-coesivos por tração no Saco do Limoeiro indicam que, durante um ciclo de sizígia em condições de mar calmo, o transporte por tração de sedimentos não-coesivos é conduzido a maior parte do tempo, por correntes de vazante nos sentidos S e SE.

Correntes de enchente também podem transportar sedimentos no sentido NW ocasionalmente. Sob tais condições pode-se considerar que o Saco do Limoeiro tende a exportar sedimentos não-coesivos para o setor interno da desembocadura da Baía de Paranaguá, podendo contribuir assim, como uma das fontes de sedimentos para o assoreamento no setor interno do Canal da Galheta.

Do ponto de vista da dinâmica de sedimentos não-coesivos no Saco do Limoeiro, os resultados obtidos no levantamento de intensidade e direção de correntes de marés e os obtidos na comparação entre o levantamento batimétrico e o mosaico de fotos aéreas apontam para uma aparente contradição. Os levantamentos hidrodinâmicos indicaram uma tendência de transporte de sedimentos não-coesivos seguindo sentidos de vazante, durante ciclos de sizígia em condições de mar calmo. Por outro lado, trabalhos anteriores e a comparação entre mosaico de fotos aéreas e levantamento batimétrico indicam que as formas de fundo notáveis em fotos aéreas têm direção de migração seguindo sentidos de enchente. Esta contradição pode ser explicada pela ação de processos que atuam em escalas de tempo diferentes. O transporte de sedimentos seguindo sentidos de vazante pode ter seu sentido invertido em eventos de maior energia como durante marés meteorológicas que freqüentemente estão associadas a passagem de frentes frias.

A evolução paleogeográfica do Saco do Limoeiro e Ilha do Mel foi estudada a partir da interpretação de ambientes de sedimentação. Três unidades sedimentares foram identificadas com base em suas estruturas sedimentares e padrão textural. São elas:

a) Unidade A: Foi interpretada como sendo o registro sedimentar de um delta de maré enchente que desenvolveu-se durante os estágios finais da última transgressão. É caracterizada pela ocorrência de estratificações cruzadas planares de grande porte com sentido de migração para o interior do estuário; por estratificações cruzadas de pequeno porte com variados sentidos de migração, e por estratificações cruzadas truncadas por onda. Estas estruturas indicam a ocorrência de uma associação de processos de sedimentação decorrentes da ação de fluxo trativo por correntes de maré e de fluxo oscilatório por ondas pequenas em ambiente raso. Tem mais de 7 m de espessura, seu topo está entre +1,5 m e +2,0 m de altitude e sua base possivelmente esteja entre -10 m e -15 .

b) Unidade B: Foi interpretada como sendo o registro sedimentar da face de uma praia de mar aberto, que teria emergido sobre o delta de maré enchente (Unidade A) depois do máximo transgressivo que ocorreu $\cong 5.100$ A.P. É caracterizada por estratificações plano-paralelas horizontais e sub-horizontais e níveis de concentração de minerais pesados, geralmente relacionados a fluxos trativos de regime superior associados a leitos planos. Essa unidade ocorre em elevações entre +4,3 m e +1,0 m com espessuras de até 3,4 m.

c) Unidade C: Foi interpretada como sendo um campo de ondas de areia com estruturas sedimentares similares às de uma planície de maré. Representa o registro geológico dos processos sedimentares que hoje atuam no Saco do Limoeiro. É caracterizada por uma camada de topo com cerca de 70 cm de espessura sem estruturas visíveis, e uma camada basal formada por uma alternância entre porções amorfas de areia argilosa, argila e porções de areia fina, dispostas de maneira irregular devido a intensa bioturbação. Estas estruturas estariam relacionadas a uma combinação entre processos sedimentares de fluxo trativo e de decantação. Seu limite superior está em média a -0,6 m de elevação e seu limite inferior varia entre -1,9 e -4,1 m. Sua espessura média varia entre 1,5 m e 3,5 m.

A deposição de sedimentos no Saco do Limoeiro iniciou-se aproximadamente a 2.850 ± 30 anos A.P. Depositaram-se na forma de um prisma sobre uma plataforma que teria evoluído através da erosão de pelo menos 60 milhões de m³ de sedimentos do topo da barreira holocênica (Unidades A e B). Essa erosão seria decorrente de um fenômeno natural de circulação estuarina, ocasionada pela interação entre correntes de maré e os pontais rochosos do sul da Ilha do Mel. Essa interação teria ocasionado uma deflexão turbulenta do fluxo de maré enchente para a direita, iniciando um processo de erosão na margem sudoeste da Ilha do Mel. Este processo está evoluindo e dá a forma que as enseadas do Saco do Limoeiro e da Praia de Encantadas têm atualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, J.R.L. 1980. Sand waves: A model of origin and internal structure. **Sedimentary Geology**. Amsterdam, n.26, p. 281-328.
- ANGULO, R.J. 1992. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 334p.
- ANGULO, R. J. 1995. Feições deposicionais associadas às desembocaduras dos complexos estuarinos da costa paranaense. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 5. Niterói. **Bol. de Res. Expandidos**. Niterói, p. 58-64.
- ANGULO, R. J. 1999. Morfological Characterization of the Tidal Deltas on the Coast of the State of Paraná. **An. Acad. Bras. Ciênc.** n. 71(4-II), p.935-959.
- ANGULO, R. J; LESSA, G.C., 1997. The Brazilian sea level curves: a critical review with emphasis on the curves from Paranaguá and Cananéia regions. **Mar. Geol.** n. 140, p. 141-166.
- ANGULO, R.J.; SUGUIO, K. 1995. Re-evaluation of the Holocene sea-level maxima for the State of Paraná, Brazil. **Paleogeol., Paleoclimatol., Paleoecol.** v. 113, p. 385-393.
- ANGULO, R.J.; SOUZA, M.C. de. 1999. Relative variation curves in sea-level during the last 7.000 years in Brazil: a review. In: Fletcher, C.H. and Matthews, J.V. (editors), 1999. **The non-steady state of the inner shelf and shoreline: coastal change on time scale of decades to millennia in the Quaternary**. Abstracts with Programs, Inaugural Meeting of IGCP Project #437 "Coastal environmental change during sea level highstands", Honolulu, Hawaii.

ANGULO R.J.; SOUZA, M.C.; ARAÚJO, A.D.; PESSEDA, L.C.R.; ODRESKI L.L.R.; LAMOUR, M.R.; CARRILHO, J.C.; NADAL, C.A. 1999. Fácies sedimentares de uma barreira regressiva holocênica na planície costeira de praia de leste, Estado do Paraná. *In: VII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Porto Seguro Anais/CD-ROM.*

ARAÚJO, A.D.; LESSA, G.C. 1996. Nível médio do mar e estruturas praiais: Uma contribuição ao estudo Paleogeográfico da planície costeira paranaense. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39º, Salvador. Anais... SBG, Salvador, n. 5, p.237-240.*

ARAÚJO, A.D.; LESSA, G.C.; ANGULO, R.J. 1997. Estruturas sedimentares e ambientes de sedimentação da barreira holocênica na região de Pontal do Sul (PR). *In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 5º, Curitiba. Bol. de Res. Expandidos. Curitiba, p.34-37.*

BANDEIRA, J.V. 1972. **Estudo estatístico das ondas ao largo da Baía de Paranaguá.** Tese de mestrado. UFRGS. Porto Alegre. 64p.

BIGARELLA, J.J. 1946. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. **Arq. Biol. Tecn.**, Curitiba, n. 4, p. 11-75.

BIGARELLA, J.J. 1965. Subsídios para o estudo das variações do nível oceânico no Quaternário brasileiro. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Curitiba, n. 37 (suplemento). p. 263-278.

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; MATOS, D.J.; WERNER, A. 1978. **A Serra do Mar e a Porção Oriental do Estado do Paraná.** Secretaria de Estado do Planejamento, Governo do Paraná. 248p.

- BLACK, K.P.; HEALEY, T.R. 1986. The sediment threshold over tidally induced mega-ripples. **Mar. Geol.**, n. 69, p. 219-234.
- BOOTHROYD, J.C.; HUBBARD, D.K. 1975. Genesis of bedforms in mesotidal estuaries. In: L.E. CRONIN (Ed.), *Estuarine research*, 5, II. **Geology and Engineering**. Academic Press, New York, N. Y., p.129-149.
- CAMARGO, M.G. 1999. **SYSGRAM para windows: Sistema de análises granulométricas**. Pontal do Sul. 2 disquetes de 5 ¼.
- CAMPBELL, C.V. 1967. Lamina, laminaset, bed and bedset. **Sedimentology**. Amsterdam, n. 8, p. 7-26.
- CARVER, R.E. 1971. Settling analysis. In: **Procedures in sedimentary petrology**. New York: Wiley-Interscience. p.427-452.
- DAVIES JR, R.A. 1994. Barrier island system - a geologic overview. In: DAVIES JR, R.A. ed. **Coastal sedimentary environments**. New York. Springer-Verlag. p.287-360.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. 1995. **Carta náutica 1824. Da Barra de Paranaguá a Antonina**. Rio de Janeiro. 1 mapa. Escala 1:50.000.
- FINLEY, R.J., 1975. Hydrodynamics and tidal deltas of North Inlet, South Carolina. In: CRONIN L.E. ed. **Estuarine Research**, 2. Academic Press, New York, N.Y. p. 227-292.
- FINLEY, R.J., 1978. Ebb-tidal delta morphology and sediment supply in relation to seasonal wave energy flux, North Inlet, South Carolina, **J. Sediment. Petrol.**, n. 48, v. 1, p. 227-238.

- HAYES, M. O. 1975. Morphology of sand accumulations in estuaries. In: CRONIN, L.E. (ed). **Estuarine Research, Geology and Engineering**. New York. Acad. Press, v. 2, p.3-22.
- HAYES, M. O. 1980. General morfology and sediment patterns in tidal inlets. **Sediment. Geol.**, n. 26, p. 139-156.
- HICKS, D.M.; HUME, T.M.,1996. Morfology and size of Ebb Tidal Deltas at Natural Inlet on Open-sea And Poquet-bay Coasts North Island, New Zealand. **J. Coastal Research**, Fort Lauderdale (Flórida), n. 12, v. 1, p. 47-63.
- HUBBARD, D.K.; OERTEL,G.F., NUMMENTAL,D.,1979. The role of waves and tidal currents in the development ot tidal-inlet sedimentary structures and sand body geometry: Examples from North Carolina and Georgia. **J. Sediment. Petrol.**, n.49, p. 1073-1092.
- KE, X.; COLLINS, M.B.;POULOS,S.E., 1994. Velocity structure and sea bed roughness associated with intertidal (sand and mud) flats and saltmarshes of the Wash, U.K.. **J. Coastal Reserch**, 10 (3), Fort Lauderdale (florida), p.702-715.
- KNOPPERS,B.A; BRANDINI, F.P.; THAMM, C.A. 1987. Ecological studies in the bay of Paraguá. II. Some physical and chemical característics. **Nerítica**, n.2, p. 1-36.
- LAMOUR, M.R. 2000. **Dinâmica sedimentar de Canal da Galheta, via de acesso ao porto de Paranaguá – PR**. Dissertação de Mestrado, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 100p.
- LESSA, G.C., MEYERS, S.D., MARONE, E. 1998. Holocene stratigraphy in Paranaguá Bay estuary, south Brazil. **J. Sed. Res.** v. 68, n. 6, p. 1060-1076.

- LESSA, G.C.; ANGULO, R.J.; GIANNINI, P.C.; ARAÚJO, A.D. (2000). Stratigraphy and Holocene evolution of a regressive barrier in south Brazil. **Marine Geology**, n. 165 (1-4), p. 87-108.
- LETTAU, H., 1969. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. **J. Appl. Meteorol.**, n. 8, p. 828-832.
- LUDWIK, J.C. 1989. Bed load transport of Sand mixtures in estuaries: A review. **J. Geophysical Research**, n. 94 (C10), p. 14.315-14.326.
- MANTOVANELLI, A. 1999. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba. 152p.
- MARONE, E.; CAMARGO, R. 1994. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**, n. 8, p. 73-85.
- MARONE, E.; JAMIYANAA, D. 1997. Tidal characteristics and a variable boundary numerical model for the M2 tide for the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, PR, Brazil. **Nerítica**, v. 11 (1-2), p. 95-107.
- MARONE, E.; MANTOVANELLI, A.; NOERNBERG, M.A. ; KLINGENFUSS, M.S.; LAUTERT, L.F.C.; PRATA JUNIOR, V.P. 1997. **Caracterização física do complexo estuarino da Baía de Paranaguá**. Pontal do Sul: UFPR. V.2. Relatório consolidado do convênio APPA/CEM.
- MILLER, M.C., McCABE, I.N., KOMAR, P.D. 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. **Sedimentology**, n. 24, p. 507-527.
- OERTEL, G.F., 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia estuaries. In: CRONIN, L.E. (ed.), **Estuarine Research**. New York: Academic, n. 2, p. 267-276.

- PARANHOS, A.C.F. 1996. **O processo erosivo e as variações morfodinâmicas praias na Ilha do Mel (Baía de Paranaguá – PR)**. Dissertação de mestrado, UFPR, Curitiba, 239p.
- PORTOBRÁS. 1983. **Relatório de apresentação das medições meteorológicas observadas em Pontal do Sul, Paranaguá – PR, período set. 1982 a dez. 1986**. Rio de Janeiro: INPH. 189p.
- SUGUIO, K., MARTIN, L., BITTENCOURT, A.C.S.P., DOMINGUEZ, J.M.L., FLEXOR, J.M., AZEVEDO, A.E.G., 1985. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Rev. Bras. Geocienc.** , n. 15(4), p. 273-286.
- TANNER, W.F. 1995. Enviromental clastic granulometry. **Fla. Geol. Surv. Bull.** (publicação especial), Tallahassee, n. 40, 142 p.
- WENTWORTH, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **J. Geol.**, Chicago, n. 30, p. 377-392.
- YANG, C.S., 1986. Estimates of sand transport in the Oosterschelde tidal basin using current-velocity measurements. **Mar. Geol.**, n. 72, p. 143-170.
- YALIN, M.S. 1972. **Mechanics of sediment transport**. Pergamon Press, New York.